

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MĚŘENÍ TVRDOSTI MATERIÁLŮ **A ZPRACOVÁVÁNÍ ZJIŠTĚNÝCH HODNOT** **MEASURING HARDNESS AND FINAL DATA BASE MANAGENT**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MIROSLAV MACHÁČ

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MILAN KALIVODA

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/10

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Macháč Miroslav

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Měření tvrdosti materiálů a zpracovávání zjištěných hodnot.

v anglickém jazyce:

Measuring hardness and final data base management.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Metody měření tvrdosti. Formáty a archivace naměřených výsledků. Základy statistiky. Produkty k vyhodnocování databází. Uvedení situace z prostředí konkrétní firmy.

Cíle bakalářské práce:

Rozbor metod měření tvrdosti. Přiblížení problematiky zpracování naměřených dat. Vyvození závěrů ze získaných výsledků. Doložení příkladem.

Seznam odborné literatury:

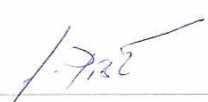
1. KOCMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
2. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-972299-4-6.
3. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd. Praha: MM publishing s. r. o., 2008. 240 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Milan Kalivoda

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.

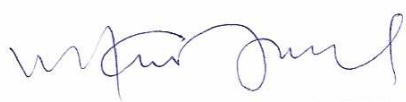
V Brně, dne 20.11.2009

L.S.



prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu





doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na rozbor zkoušek tvrdosti a metody vyhodnocení změřených hodnot. Teoretická i experimentální část klade důraz na zkoušení kovových technických materiálů, pomocí nejpoužívanějších metod v technické praxi. V experimentální části byla provedena čelní zkouška prokalitelnosti.

Klíčová slova

Tvrdost, Zkoušky tvrdosti, Brinell, Rockwell, Vickers

ABSTRACT

This work is focussed on analysis of hardness tests and methods of evaluating the measured values. Theoretical and practical part emphasizes on testing iron materials, with the help of the most practically used methods. In practical part was executed Jominy test.

Key words

Hardness, hardness testing, Brinell, Rockwell, Vickers

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MACHÁČ, M. *Měření tvrdosti materiálů a zpracovávání zjištěných hodnot.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 57 s., 4 přílohy. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Měření tvrdosti materiálů a zpracovávání zjištěných hodnot vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

19. 5. 2010

.....
Miroslav Macháč

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu práce Ing. Milanu Kalivodovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

Dále děkuji Ing. Petru Liškutínovi za pomoc v praktické části bakalářské práce a za zapůjčení studijních materiálů.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah	7
Úvod	8
1 TVRDOST A VLIVY KTERÉ JI OVLIVŇUJÍ	9
1.1 Historie a vývoj	9
1.2 Nejpoužívanější zkoušky tvrdosti v dnešní době	10
1.3 Dělení metod měření tvrdosti	11
2 STATICKÉ ZKOUŠKY MAKROTVRDOSTI	12
2.1 Vnikací zkoušky	12
2.1.1 Zkouška tvrdosti dle Brinella	12
2.1.2 Zkouška tvrdosti dle Rockwella	17
2.1.3 Zkouška tvrdosti dle Vickerse	20
2.2 Vrypové zkoušky	23
3 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI	25
3.1 Dynamicko – plastické zkoušky tvrdosti	25
3.1.1 Zkouška tvrdosti kladívkem Poldi	25
3.1.2 Zkouška tvrdosti Baumannovým kladívkem	26
3.2 Dynamicko – elastické zkoušky tvrdosti	27
3.2.1 Zkouška tvrdosti Shoreho skleroskopem	27
3.2.2 Zkouška tvrdosti kyvadlovou metodou (duroskopem)	29
4 ZKOUŠKY MIKROTVRDOSTI	30
4.1 Zkouška mikrotvrdomosti podle Vickerse	30
4.2 Zkouška mikrotvrdomosti podle Knoopu	32
5 ZKOUŠKY NANOTVRDOSTI	35
6 ZÁKLADY STATISTIKY A CHYBY MĚŘENÍ	36
6.1 Základní vztahy a pojmy statistiky	36
6.2 Chyby měření	37
7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	41
7.1 Čelní zkouška prokalitelnosti	41
7.1.1 Zkušební těleso	41
7.1.2 Ohřev a kalení zkušební tělesa	42
7.1.3 Měření tvrdosti a vyhodnocení zkoušky	43
7.2 Čelní zkouška prokalitelnosti – ocel 14 109 (100Cr6, 1.3505)	45
7.3 Čelní zkouška prokalitelnosti – ocel 12 040 (C35E, 1.1181)	47
7.4 Porovnání a vyhodnocení výsledků provedených zkoušek	51
Závěr	53
Seznam použitých zdrojů	54
Seznam použitých zkratk a symbolů	56
Seznam příloh	57

ÚVOD

Tvrdost a pevnost jsou jedny z nejdůležitějších mechanických vlastností konstrukčních materiálů užívaných ve strojírenství. Tvrdost má významný vliv na odolnost materiálu proti opotřebení a otěru. Tvrdost je důležitá i u materiálů řezných nástrojů. Materiál řezného nástroje, který by byl měkčí než obráběná součást by se nemohl účinně obrábět. Tvrdost kovových technických materiálů lze ovlivnit tepelným, případně chemicko – tepelným zpracováním. Nevýhodou velmi tvrdého materiálu je křehkost.

Různé metody měření tvrdosti využívají různých přístupů. Například u Brinellovy zkoušky má výsledná hodnota tvrdosti charakter napětí a je závislá na velikosti působící síly. Jiné metody využívají částečnou přeměnu kinetické energie na elastickou deformaci. Množství nespotřebované energie je pak mírou tvrdosti zkoušeného materiálu.

Zkoušky tvrdosti se řadí mezi zkoušky nedestruktivní, byť při nich zpravidla vzniká lokální trvalá deformace (vryp, vtisk). Tvrdost není fyzikálně definovaná, neboť je závislá na velkém množství různých faktorů.

1 TVRDOT A VLIVY KTERÉ JI OVLIVŇUJÍ

Tvrdot je mechanická vlastnost materiálu. Nejčastěji se definuje jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Tvrdot materiálu ovlivňují následující faktory [2, 4]:

- elastické vlastnosti materiálu, zejména moduly pružnosti v tahu a smyku,
- plastické vlastnosti materiálu, zejména mez kluzu,
- velikost síly, která působí na vnikací těleso,
- tvar, rozměry, tvrdot a modul pružnosti indentoru (vnikacího tělesa),
- rychlost vnikání indentoru do vzorku,
- tření mezi indentorem a vzorkem,
- tloušťka vzorku,
- doba působení zatížení,
- teplota, při které probíhá zkouška,
- vzdálenosti mezi vtisky a mezi vtiskem a okrajem vzorku,
- zpevnění, které je důsledkem tváření za studena,
- mikrostruktura materiálu.

1.1 Historie a vývoj

V roce 1722 realizoval zkoušení tvrdosti Reamur. Reamur použil tyč s proměnlivou tvrdostí (etalon) od jednoho konce k druhému. Míra tvrdosti zkoušeného materiálu byla určována podle polohy vrypu, který zkoušený materiál na etalonu zanechal. [3]

„Historicky první stupnici tvrdosti sestavil v roce 1822 Mohse. V řadě za sebou empiricky seřazených materiálů (tabulka 1.1) lze následujícím materiálem provést vryp do materiálu předcházejícího. Tato metoda se používá v mineralogii; pro měření technických materiálů jsou její stupně relativně velké a nerovnoměrné.“ [2]

Tab. 1.1 Mohsova stupnice tvrdosti [2]

číslo tvrdosti	minerál	chemický vzorec
1	mastek	$\text{Mg}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)_2(\text{OH})_2$
2	sádrovec	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
3	vápenec	CaCO_3
4	kazivec	CaF_2
5	apatit	$\text{Ca}(\text{PO}_4)_3 (\text{F}, \text{Cl})$
6	živec	KAlSi_3O_8
7	křemen	SiO_2
8	topas	$\text{Al}_2\text{SiO}_4 (\text{F}, \text{OH})$
9	korund	Al_2O_3
10	diamant	C

„V této stupnici je seřazeno 10 nerostů, z nichž každý následující je schopen vyrýt do všech předcházejících nerostů vryp.“ [5]

„Kirsch (1891) navrhl zatlačování válcového indentoru zvětšující se silou až do okamžiku, kdy se objevil první trvalý vtisk. Příslušné tlakové napětí bylo mírou tvrdosti. Protože bylo skutečné zjištění tohoto napětí spojeno s jistými nepřesnostmi, bylo doporučeno čelní plochu zakulatit velkým poloměrem. Další vývoj směřoval ke zjištění souvislosti mezi tvrdostí a mezí kluzu. Z tohoto důvodu bylo prováděno např. několikastupňové zatěžování kuličkou ve stejném místě, přičemž po zatížení bylo provedeno rekrytalizační žíhání. Tento cyklus se opakoval dokud se vtisk již více nezvětšoval. Z dosaženého rozměru vtisku pak byla určena tvrdost – Hanriot (1912). Na začátku 20. století byla vyvinuta celá řada podobných metod, které však pro svoji zdlouhavost, ale i nepřesnost nenašly uplatnění.“ [5]

1.2 Nejpoužívanější zkoušky tvrdosti v dnešní době

V současné době jsou u nás normovány a nejvíce používány následující zkoušky tvrdosti:

- **Zkouška tvrdosti podle Brinella**

Princip Brinellovy zkoušky spočívá ve vtlačování indentoru do zkoušeného materiálu. Indentor má tvar kuličky. Metoda je vhodná pro měkké a středně tvrdé materiály. Výsledná tvrdost se vypočte z rozměru vtisku a zátěžné síly.

- **Zkouška tvrdosti podle Rockwella**

Indentorem u Rockwellovy zkoušky je buď kalená kulička nebo diamantový kužel. Metoda umožňuje měřit materiály měkké i velmi tvrdé. Lze ji s výhodou použít v dílenském prostředí, neboť hodnota tvrdosti se odečítá přímo na tvrdoměru a není nutno měřit velikost vtisku.

- **Zkouška tvrdosti podle Vickerse**

Vickersova zkouška využívá indentoru, který má tvar pravidelného čtyřbokého jehlanu. Metoda je velmi přesná a lze použít pro měkké i pro velmi tvrdé materiály. Zkouška dle Vickerse se používá pro měření mikrotvrdosti i makrotvrdosti.

- **Zkouška tvrdosti podle Knoop**

Zkušební tělísko je diamantový jehlan, jehož základnou však není čtverec, ale velmi protáhlý kosočtverec. Vtisk má tvar kosočtverce s poměrem úhlopříček asi 1:7. Knoopova zkouška se využívá pro určování mikrotvrdosti materiálu. [5]

„V současné době existují tvrdoměry, které pracují ve spojení s počítačem. Jedním z posledních modelů je v USA vyvinuté měřící zařízení na principu tvrdoměru, které na základě široké počítačové databáze dokáže predikovat nejen tahový diagram a lomovou houževnatost zkoušeného materiálu, ale i vliv provozních podmínek na mechanické vlastnosti materiálu (vliv radiace na materiál jaderného reaktoru, vliv zvýšené teploty na materiál rotoru parní turbíny apod.).“ [1]

1.3 Dělení metod měření tvrdosti

Metody měření tvrdosti lze dělit podle různých hledisek:

1) Dle způsobu zatěžování zkoušeného materiálu [2]:

- **Statické** – zkušební těleso (indenter) je do zkoušeného materiálu vtlačováno pozvolna narůstající silou. Síla působí ve směru kolmém k povrchu vzorku. Statické zkoušky se pro svou jednoduchost, přesnost a reprodukovatelnost využívají ve strojírenství velmi často.
- **Dynamické** – indenter vniká do povrchu zkoumané součásti rázem. Jako u statických zkoušek, vniká indenter do součásti kolmo k jejímu povrchu. Zkoušky dynamické bývají též označovány jako zkoušky rázové.

2) Dle druhu vzniklé deformace ve zkoušeném materiálu [2]:

- **Dynamicko – plastické metody** – indenter vniká do zkoušeného předmětu rázem a způsobí na povrchu trvalou deformaci. Jako indenter je nejčastěji užívána kulička. Výhodou je malá hmotnost a přenosnost těchto měřicích zařízení.
- **Dynamicko – elastické metody** – zkušební tělísko dopadá rázem, který je důsledkem tíhové síly. Při nárazu je část kinetické energie spotřebována na netrvalou deformaci. Indenter je odražen zpět k výchozí pozici, ale nemá dostatek energie k jejímu dosažení. Vzdálenost odskoku indentoru je míra tvrdosti zkoušeného materiálu.

3) Dle účelu měření [3]:

- **Měření mikrotvrdosti** - Při měření mikrotvrdosti se využívá obdobných postupů jako u statických zkoušek makrotvrdosti. Zatěžovací síly se při zkoušení mikrotvrdosti pohybují od 0,09807 N do 9,807 N.
- **Měření makrotvrdosti** – při měření makrotvrdosti se neuvažuje tvrdost jednotlivých strukturních složek materiálu. Zatěžovací síly jsou při měření makrotvrdosti větší než 9,807 N.

Přehled používaných metod měření tvrdosti je v tabulce 1.2.

Tab. 1.2 Zkoušky tvrdosti [4]

zkoušky makrotvrdosti	statické	vrypové	metoda Martens
		vnikací	metoda Brinell
			metoda Vickers
			metoda Rockwell
	dynamické	plastické nárazové	metoda volným pádem
			metoda stlačenou pružinou
			porovnávací metoda
		elastické odrazové	metoda volným pádem (Shorova)
zkoušky mikrotvrdosti	statické	vnikací	metoda Vickers
zkoušky nanotvrdosti	statické	vnikací	metoda Knoop
			metoda Berkovich

2 STATICKÉ ZKOUŠKY MAKROTVRDOSTI

Statické zkoušky tvrdosti, jsou nejrozšířenější a nejpřesnější metody pro stanovení tvrdosti materiálu. Indentor je buď do vzorku vtlačován (vznikne vtisk), nebo po něm pojíždí zatížen silou (vznikne vryp), která se plynule zvyšuje. Pro vyhodnocování zkoušek se používá mikroskop, případně hloubkoměr.

Indentor nesmí podléhat trvalým deformacím. Musí mít co největší tvrdost a vysoký modul pružnosti v tahu. Pro materiál indentoru se volí kalená ocel, slinutý karbid nebo diamant. Kalená ocel lze použít pro materiály vykazující tvrdost do 450 HV. Slinutý karbid asi do tvrdosti 630 HV. Pro materiály s tvrdostí vyšší jak 630 HV lze použít pouze diamantový indentor. [2]

2.1 Vnikací zkoušky

Princip vnikacích zkoušek spočívá v zatlačování indentoru do povrchu zkoušeného materiálu. Indentor má pro každý typ zkoušky přesně definovaný tvar i rozměr. Tvar a rozměr indentoru, velikost zatížení a další podmínky pro správný průběh zkoušky popisuje norma příslušné metody.

Nejpoužívanější tvar indentoru je kulička, jehlan a kužel. Přesnost a reprodukovatelnost vnikacích zkoušek je velmi dobrá. Nevýhodou může být, že se jedná spíše o zkoušky prováděné v prostředí laboratorním. Pro velmi rozměrné součásti je nutné zvolit jiné metody, které lze použít v provozních podmínkách.

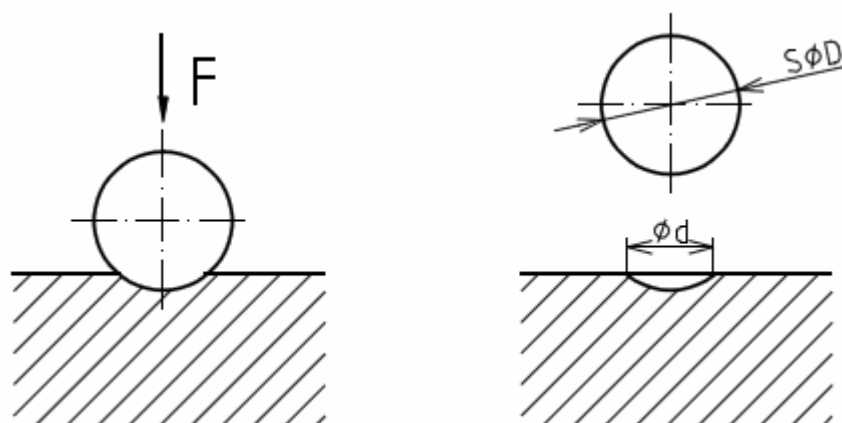
2.1.1 Zkouška tvrdosti dle Brinella

Autorem zkoušky je švédský inženýr Johan August Brinell. Svoji metodu měření tvrdosti poprvé představil na druhém mezinárodním kongresu pro zkoušení materiálů v Paříži v roce 1900. Brinellova zkouška se velmi rychle ujala a i přes své některé nedostatky je využívána dodnes. Zkoušku popisuje norma ČSN EN ISO 6506. [5, 2]

Indentor je kulička. Pro měření tvrdosti měkčích materiálů se používá zakalená ocelová kulička (do 450 HB). Při zkoušení materiálů, u kterých se předpokládá vyšší tvrdost je použita kulička ze slinutého karbidu (do 650 HB). Používají se kuličky o následujících průměrech: 10; 5; 2,5; 2 a 1 mm. Hodnoty tvrdosti změřené ocelovou kuličkou a kuličkou ze slinutého karbidu se podstatně liší při tvrdostech nad 350 HB. [4, 9]

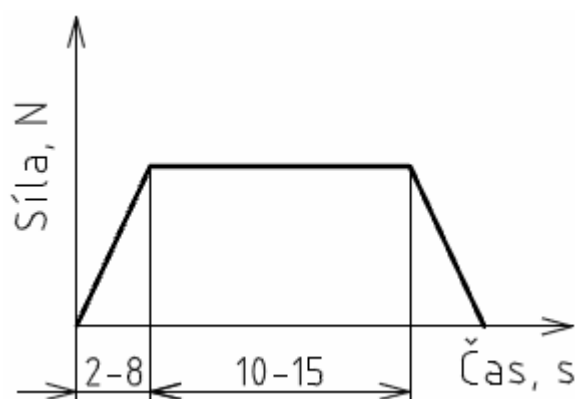
Postup při měření tvrdosti dle Brinella

Před vlastním měřením je potřeba vhodně připravit povrch vzorku. Protože zhotovené vtisky jsou relativně velké, není nutný velmi kvalitně upravený povrch. Na povrchu se nesmí nacházet cizí tělesa, okuje ani mazadla. Kulička je do materiálu vtlačována kolmo k jeho povrchu. Princip zkoušky je zobrazen na obrázku 2.1. [4]



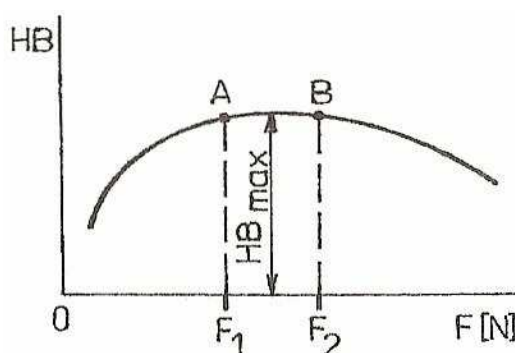
Obr. 2.1 Princip zkoušky dle Brinella

Náběh zatížení z nuly do jeho nominální hodnoty musí být v rozmezí 2 s až 8 s. Doba trvání plného zatížení je pro slitiny železa stanovena na 10 s až 15 s, u neželezných slitin 10 s až 180 s, podle materiálu. Průběh zatěžovací síly je zobrazen na obrázku 2.2. [4]



Obr. 2.2 Průběh zkušebního zatížení [9]

Průměr indentoru D je volen tak, aby byl průměr vtisku v rozmezí $0,25D$ až $0,6D$, někdy se uvádí $0,3D$ až $0,6D$. Důvodem pro dodržení tohoto rozmezí je, že výsledná hodnota tvrdosti je závislá na velikosti působícího zatížení. Pokud se bude při stejném zkoušeném materiálu a stejném průměru kuličky měnit zátěžná síla, bude se měnit i hodnota naměřené tvrdosti. Na obrázku 2.3 je znázorněn průběh tvrdosti v závislosti na měnícím se zatížení. [1, 4]



Obr. 2.3 Závislost tvrdosti HB na velikosti zátěžné síly [4]

Příčina tohoto problému je v tom, že si vtisky při stejném průměru indentoru a různé zatěžující síle nezachovávají geometrickou podobnost. Z obrázku 2.3 plyne, že největší naměřená tvrdost bude v rozsahu zatěžovacích sil F_1 až F_2 . Empiricky bylo dokázáno, že maximální hodnoty tvrdosti budou naměřeny pokud průměry vtisků leží právě v rozsahu $0,25D$ až $0,6D$. Aby bylo možno srovnávat hodnoty naměřené při různých zátěžných silách a průměrech kuliček, je potřeba zachovat geometrickou podobnost vtisků. [4]

Pro zajištění geometrické podobnosti platí vztah [4]:

$$F = K \cdot D^2 \quad (2.1)$$

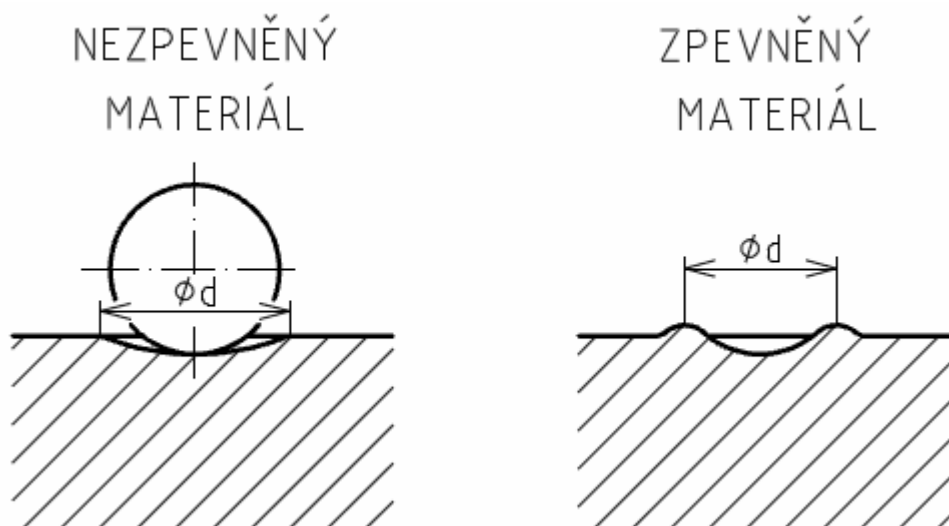
Kde K je konstanta zahrnující druh zkoušeného materiálu. Pro ocel a litinu $K = 30$, pro měkké neželezné kovy $K = 10$. [4]

Tvrdost podle Brinella je vyjádřena poměrem zkušebního zatížení ku ploše vtisku. Při vyhodnocování zkoušky se vychází z průměru vtisku a z velikosti zátěžné síly. Průměr vtisku se měří pomocí mikroskopu a to ve dvou na sebe kolmých směrech. Rozdíl mezi naměřenými hodnotami průměrů nesmí převýšit 5% menšího z nich. Z obou naměřených hodnot se vypočte aritmetický průměr d . [4]

Hodnota tvrdosti podle Brinella se určí ze vztahu [4]:

$$HB = 0,102 \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.2)$$

Při měření tvrdosti zpevněných materiálů je možnost vytvoření valu okolo vtisku. Takové vtisky se obtížněji měří. U materiálů nezpevněných je možnost vtažení okraje viz obrázek 2.4.

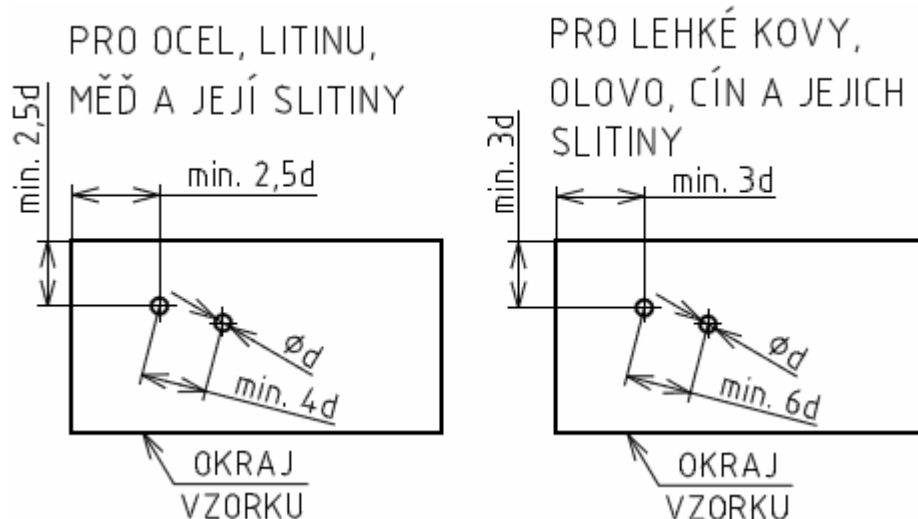


Obr. 2.4 Deformace okrajů vtisku při měření tvrdosti dle Brinella [4]

Brinellova zkouška je vhodná pouze pro měkké a středně tvrdé materiály. Využívá se zejména pro odlitky, hrubozrnné materiály a materiály s texturou po tváření. Předně se používá největší možný průměr kuličky (10 mm), který zaručuje největší přesnost zkoušky. Pro zjištění tvrdosti dle Brinella je doporučeno provést tři měření a výslednou hodnotu určit jako aritmetický průměr.

Nároky na správný průběh zkoušky

Nejmenší tloušťka zkoušeného tělesa musí být nejméně desetinásobek hloubky vtisku, aby vznikla plastická deformace pouze ve zkoušeném materiálu. Aby nedošlo k ovlivnění výsledku měření okrajem vzorku nebo zpevněným okolím sousedního vtisku, je nutné dodržení vzdáleností zobrazených na obrázku 2.5. [4]

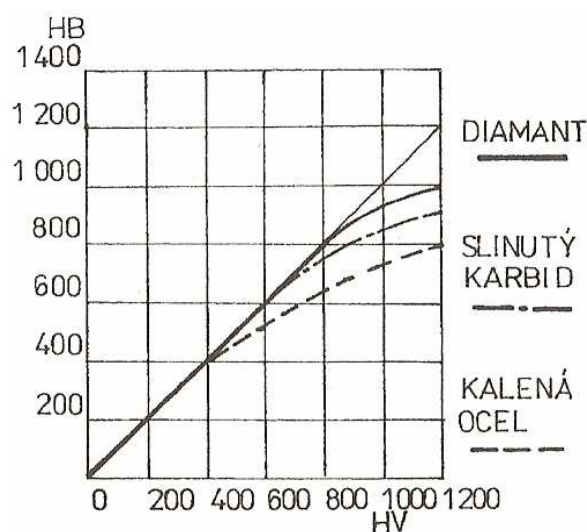


Obr. 2.5 Minimální vzdálenosti mezi vtisky a mezi vtiskem a okrajem [9]

Měření je nutno provádět za teploty 10 °C až 35 °C. V arbitrážních případech za teploty 23 ± 5 °C. Indentor se zatlačuje kolmo k povrchu vzorku bez rázů a chvění. [9]

Další aplikace Brinellovy metody

Přibližně do hodnoty 400 HB je možno převádět hodnoty tvrdosti podle Brinella na tvrdost podle Vickerse a naopak viz obrázek 2.6. [4]



Obr. 2.6 Vzájemný vztah mezi tvrdostmi HB a HV [4]

Experimentálně byla zjištěna závislost mezi hodnotami tvrdostí HB a mezí pevnosti.

Vztah mezi tvrdostí podle Brinella a mezí pevnosti [4]:

$$R_m = k \cdot HB \quad (2.3)$$

Kde k je konstanta zahrnující vliv druhu materiálu. Pro následující materiál platí [4]:

- uhlíkové a nízkolegované oceli $k = 3,4$ až $3,6$,
- austenitická vyžíhaná ocel $k = 3,7$ až $4,0$,
- měď a její slitiny $k = 4,0$ až $5,0$.

Výpočet ze vztahu 2.3 je pouze přibližný, neboť tahová zkouška udává průměrné hodnoty z průřezu zkušební tyče a povrch nemusí mít stejné vlastnosti jako jádro. [4]

Modifikovaná metoda měření tvrdosti HBT

„Uvedená metoda se obvykle používá v případě nutnosti automatizace měřicího procesu např. na lince pro zušlechťení materiálu apod. Odchyšky tvrdosti zjištěné měřením z hloubky vtisku ($HB - HBT$) jsou korigovány konstantami k_1 a k_2 . Velikost odchylek se pohybuje při měření měkkých materiálů cca 3 – 4%, u středně tvrdých 1% a u tvrdých materiálů dosahuje 3,5% naměřené hodnoty tvrdosti.“ [9]

Vztah pro výpočet tvrdosti podle Brinella z hloubky vtisku [4]:

$$HBT = \frac{F \cdot 0,102}{\pi \cdot D \cdot h_b} + k_1 + k_2 \quad (2.4)$$

Označení naměřené tvrdosti dle Brinella:

Tab. 2.1 Posloupnost parametrů v označení tvrdosti dle Brinella

X HB Y D/F t
X – naměřená hodnota tvrdosti [-]
HB – Brinellovo tvrdostní číslo (hardness Brinell)
Y – druh materiálu indentoru: S – ocel (steel), W – slinutý karbid
D – průměr indentoru [mm], pokud je $D = 10$ mm neuvádí se
F – velikost zátěžné síly [kp], pokud je $F = 3\,000$ kp neuvádí se
t – doba působení zatížení [s], pokud je $t = 10$ s až 15 s neuvádí se

Příklady označení naměřené tvrdosti dle Brinella:

- **200 HBS** – zkouška byla prováděna ocelovou kuličkou o průměru 10 mm, zátěžná síla $F = 29\,430$ N doba působení zatížení od 10 do 15 s (základní zkouška).

- **163 HBW 5/750/20** – tvrdost podle Brinella, indetor byla kulička ze slinutého karbidu o průměru 5 mm, zátěžná síla 7 355 N (750 kp) a zatížení trvalo 20 s.

2.1.2 Zkouška tvrdosti dle Rockwella

Metodu vytvořil Stanley P. Rockwell. Indentor je buď kalená kulička nebo diamantový kužel. Kuličky mají průměr buď 1/16" (1,5875 mm) nebo 1/8" (3,175 mm). Kužel má vrcholový úhel $120^\circ \pm 0,5^\circ$ a poloměr zaoblení špičky 0,2 mm. Indentor se volí podle druhu stupnice. Každá stupnice je navržena pro nějaký druh materiálu viz tabulka 2.2 a 2.3. Zkouška je popsána normou ČSN EN ISO 6508. [2, 4]

Princip zkoušky je odlišný od metody Brinellovy. Na rozdíl od Brinellovy zkoušky se hodnota tvrdosti podle Rockwella odečítá přímo na tvrdoměru a pro její stanovení se vychází z hloubky vtisku. Tvrdost tedy nemá povahu napětí. Výhoda je v tom, že měření není ovlivněno geometrií vtisku (zpevněný a nezpevněný materiál). Rockwellova metoda je rychlá a pohodlná, používá se při hromadné a automatizované výrobě v kalárnách při cementování a nitrlování. Nevýhodou je, že každé poškození kužele ovlivňuje tření mezi ním a zkoušeným materiálem. Přesnost je tedy v porovnání s metodou Brinellovou a Vickersovou menší. Metoda umožňuje zkoušet materiály měkké, tvrdé i tenké povrchové vrstvy. [4]

Tab. 2.2 Přehled stupnic Rockwellovy metody a jejich použití [5]

stupnice	indentor	zatížení [N]			rozsah měřitelné stupnice		použití		
		F ₀	F ₁	F _C	počet dílků	hloubka [mm]			
C	diamantový kužel		1 373	1 471	100	0,2	tepelně zpracované oceli a litiny		
		490,3	588,4						
A		98,07	882,6	980,7		slabé průřezy tvrdých kovů, slinuté karbidy			
D		29,42	117,7	147,1					
15N 30N 45N			264,8	294,2	0,1		tenké součásti a povrchové vrstvy		
		411,9	441,3						
B	ocelová kulička Ø 1,5875 mm		882,6	980,7	130	0,26	neželezné kovy		
		1 373	1 471						
G		98,07	490,3	588,4		0,1	měkké oceli, neželezné kovy		
F		29,42	117,7	147,1	100			0,1	tenké součásti a měkké povrchy
15T 30T 45T			264,8	294,2					

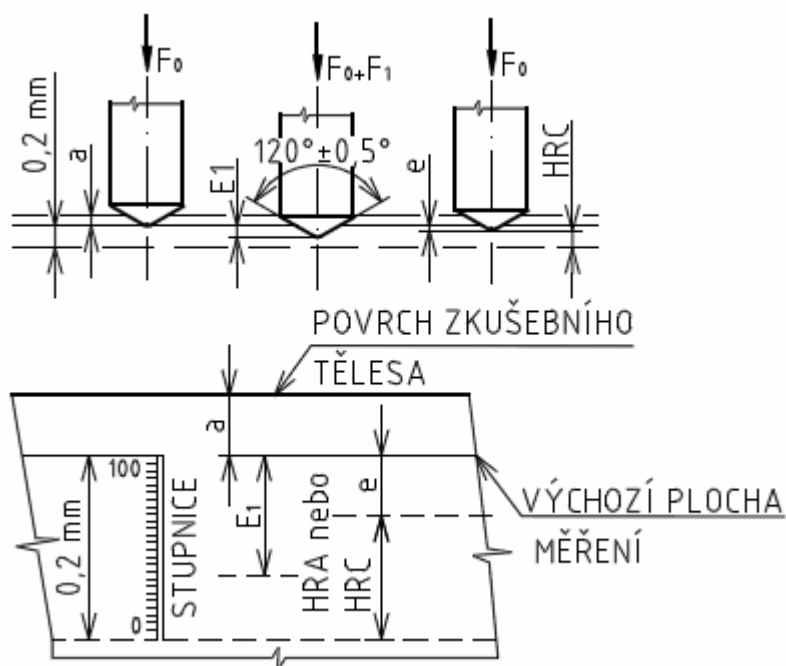
Tab. 2.3 Přehled stupnic Rockwellovy metody a jejich použití [5]

stupnice	indentor	zatížení [N]			rozsah měřitelné stupnice		použití
		F_0	F_1	F_c	počet dílků	hloubka [mm]	
H	ocelová kulička $\varnothing 3,175 \text{ mm}$	98,07	490,3	588,4	130	0,26	hliník, cín, olovo
E			882,6	980,7			
K			1 173	1471			litiny, hliníkové slitiny a jiné měkké materiály

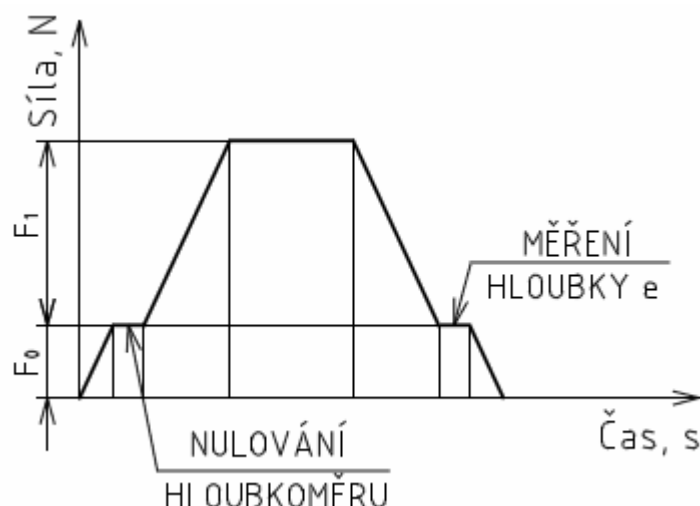
Postup při měření tvrdosti dle Rockwella

Při měření se zkoušený předmět položí kolmo pod indentor. Následuje vtlačení indentoru do materiálu předběžným zatížením F_0 (98,1 N, pro stupnice A, B, C). Účelem předběžného zatížení je vyrovnání nerovnosti povrchu vzorku. Indentor je silou F_0 vtlačen do hloubky a . Následně se hloubkoměr tvrdoměru nastaví na nulu.

Jakmile je hloubkoměr vynulován zatíží se vzorek zatížením F_1 . Přídavným zatížením F_1 je indentor zatlačen do hloubky $(a+E_1)$. Po dosažení zatížení F_c se zatížení odlehčí na F_0 . Na tvrdoměru se odečte hodnota tvrdosti vzorku, která je dána vtiskem o hloubce e . Odečítací zařízení obsahuje dvě stupnice. Červená slouží pro kuličku, černá pro kužel. Princip zkoušky je graficky znázorněn na obrázku 2.7. Na obrázku 2.8 je názorně ukázán průběh zkušebního zatížení.



Obr. 2.7 Princip Rockwellovy zkoušky (kužel) [4]



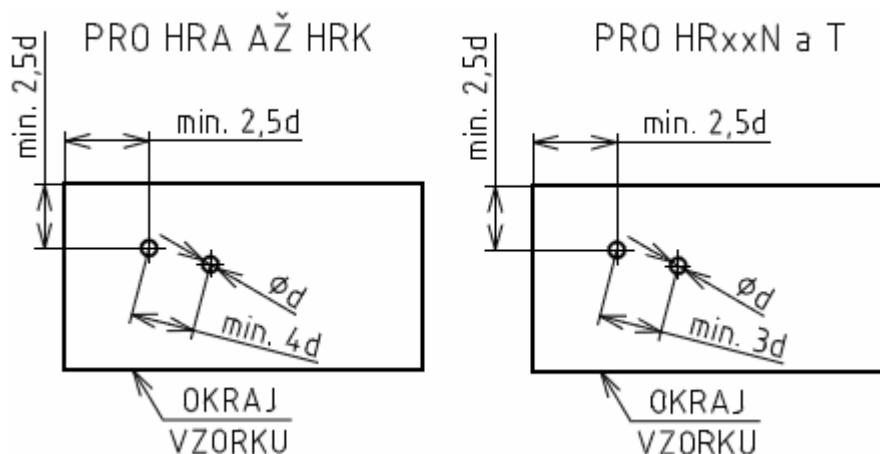
Obr. 2.8 Průběh zkušebního zatížení [9]

Nároky na správný průběh zkoušky [9]

Povrch vzorku musí být hladký a rovný. Na povrchu nesmí být okuje, cizí tělíska ani mazadla. Tloušťka vzorku musí být nejméně desetinásobek hodnoty hloubky vtisku e . Zkouška se provádí za teploty $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. V arbitrážních případech je nutno zkoušku provádět při teplotě $23 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Indentor musí být do materiálu vtlačován bez rázů a chvění. Doba hlavního zatížení musí být v rozmezí od 2 s do 8 s u metod HRA až HRK. U metod HRxx N a HRxx T 1 s až 8 s. Doba působení celkového zatížení je:

- 1 s až 3 s u materiálů, které nevykazují závislost plastické deformace na čase,
- 1 s až 5 s u materiálů, které vykazují omezenou závislost plastické deformace na čase,
- 10 s až 15 s u materiálů, které vykazují silnou závislost plastické deformace na čase.

Minimální potřebné vzdálenosti mezi vtisky a mezi vtiskem a okrajem vzorku jsou znázorněny na obrázku 2.9.



Obr. 2.9 Minimální vzdálenosti mezi vtisky a mezi vtiskem a okrajem [9]

Označení naměřené tvrdosti dle Rockwella:

Tab. 2.4 Posloupnost parametrů v označení tvrdosti dle Rockwella

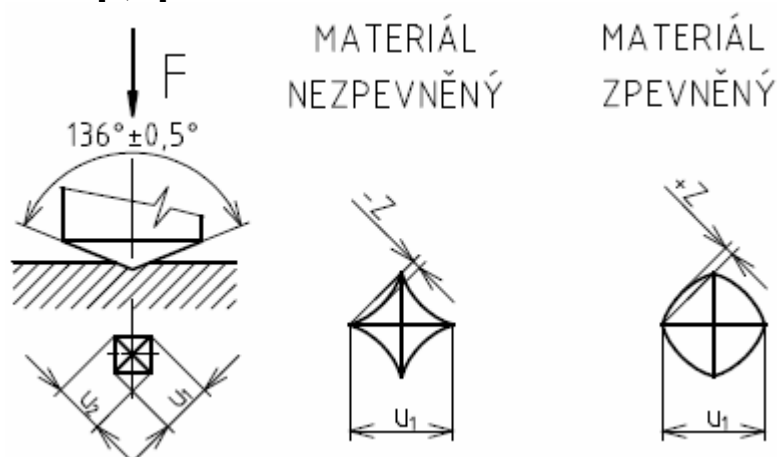
X HR Y
X – naměřená hodnota tvrdosti [-]
HR – Rockwellovo tvrdostní číslo (hardness Rockwell)
Y – druh stupnice
X HR YS
X – naměřená hodnota tvrdosti [-]
HR – Rockwellovo tvrdostní číslo (hardness Rockwell)
Y – velikost zkušebního zatížení [kp]
S – druh stupnice

Příklady označení naměřené tvrdosti dle Rockwella:

- **55 HRC** – tvrdost je 55, měřeno na stupnici C (jehlan).
- **67 HR 30N** – tvrdost je 67, měřeno na stupnici N, zatížení 294,2 N (30 kp).

2.1.3 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

Zkouška byla vyvinuta v Anglii v roce 1922, autoři zkoušky jsou R. L. Smith a G. E. Sandland. Název zkoušky je odvozen od jména tvrdoměru firmy Vickers. Vickersova zkouška se principem podobá Brinellově. Indentor je diamantový jehlan o čtvercové podstavě s vrcholovým úhlem $136^\circ \pm 0,5^\circ$. Úhel 136° byl navržen s ohledem na minimální tření mezi indentorem a vzorkem. Vickersova metoda je velmi přesná a používá se převážně pro laboratorní účely (kontrola, výzkum). Tvrdost podle Vickerse je podobně jako Brinellovy zkoušky vyjádřena poměrem působícího zatížení ku ploše vtisku. Zkoušku popisuje norma ČSN EN ISO 6507. Princip zkoušky a tvar vtisku je zobrazen na obrázku 2.10. [4, 2]



Obr. 2.10 Princip Vickersovy zkoušky a deformace vtisku při měření [5]

Postup při měření tvrdosti dle Vickerse

Podmínky základní zkoušky: indentor je vtlačován do zkoušeného materiálu zatížením 294 N. Doba působení zatížení 10 s až 15 s. Při vyhodnocování zkoušky se měří pomocí mikroskopu délky obou úhlopříček vtisku a z naměřených hodnot se vypočte aritmetický průměr u .

Hodnota tvrdosti podle Vickerse se určí ze vztahu [4]:

$$HV = \frac{0,1891 \cdot F}{u^2} \quad (2.5)$$

Nebo se určí z tabulek podle velikosti úhlopříčky u . Pokud je vtisk zdeformován užije se vztah, který zahrnuje velikost deformace Z [4]:

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{(u \pm Z \cdot \sqrt{2})^2} \quad (2.6)$$

Na obrázku 2.10 je ukázáno, kdy se do vztahu 2.6 dosazuje kladná a kdy záporná hodnota Z .

Výhodou Vickersovy zkoušky je, že lze aplikovat jak na měkké, tak na tvrdé materiály a má pro ně jednotnou stupnici. Vtisky jsou malé, tudíž nedochází k velkému znehodnocení povrchu součásti. Nevýhodou je velká náročnost na kvalitu povrchu zkoušeného (nejlépe jemně broušený) a je nutno zabránit působení chvění a rázů na tvrdoměr.

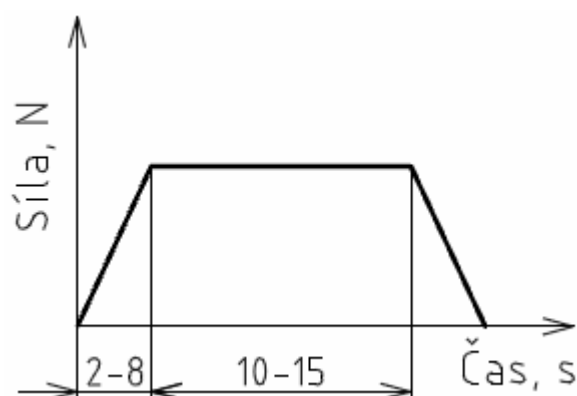
Metoda není vhodná pro hrubozrnné a heterogenní struktury, neboť vtisk by mohl vzniknout právě v zrna některé fáze a měření by nevypovídalo o celkové (průměrné) tvrdosti součásti. Zatížení používaná při měření tvrdosti metodou dle Vickerse jsou uvedena v tabulce 2.5.

Tab. 2.5 Zkušební zatížení pro zkoušku tvrdosti dle Vickerse [3]

zkouška tvrdosti dle Vickerse	
symbol tvrdosti	nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
HV 5	49,03
HV 10	98,07
HV 20	196,1
HV 30	294,2
HV 50	490,3
HV 100	980,7

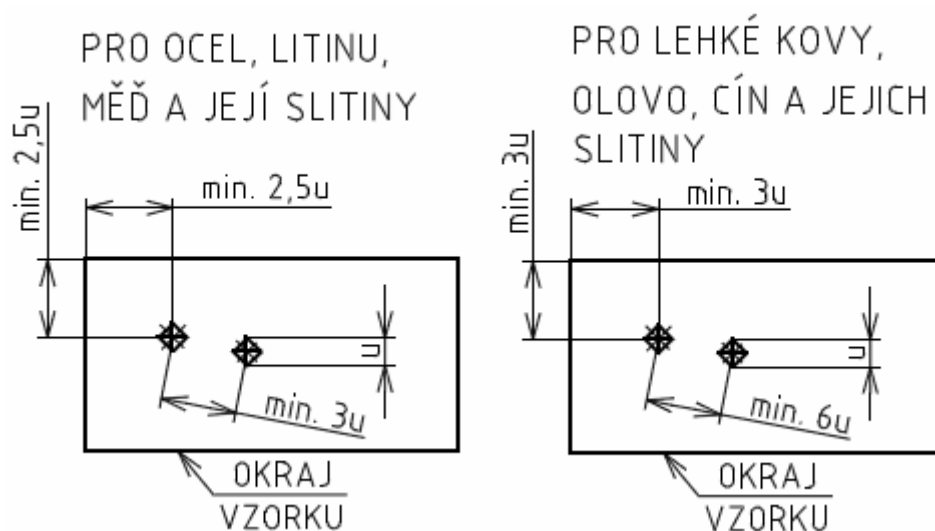
Nároky na správný průběh zkoušky [9]

Zkouška se provádí při teplotě 10 °C až 35 °C. V arbitrážních případech při teplotě 23 ±5 °C. Povrch vzorku musí být čistý, hladký, bez mazadel a cizích tělísek. Vzorek se v průběhu zkoušení nesmí pohnout. Indentor se musí zatlačovat kolmo ke zkoušenému povrchu a to bez rázů a chvění. Doba mezi počátkem zatěžování a dosažením zátěžné síly musí být v rozmezí 2 s až 8 s. Doba působení zkušební síly musí být 10 s až 15 s viz obrázek 2.11.



Obr. 2.11 Průběh zkušebního zatížení [9]

Tloušťka zkoušeného materiálu musí být u slitin železa nejméně 1,2 a u jiných slitin až 1,5 násobek aritmetického průměru délek úhlopříček vtisku. Vzdálenosti mezi sousedními vtisky a mezi vtisky a okrajem vzorku jsou zobrazeny na obrázku 2.12.



Obr. 2.12 Minimální vzdálenosti mezi vtisky a mezi vtiskem a okrajem [9]

Označení naměřené tvrdosti dle Vickerse:

Tab. 2.6 Posloupnost parametrů v označení tvrdosti dle Vickerse

$X HV Ft$
X – naměřená hodnota tvrdosti [-]
HV – Vickersovo tvrdostní číslo (hardness Vickers)
F – zátěžná síla [kp], pokud je $F = 294,2 \text{ N}$ (30 kp) neuvádí se
t – doba působení zatížení [s], pokud je $t = 10 \text{ s}$ až 15 s neuvádí se

Příklady označení naměřené tvrdosti dle Vickerse:

- **352 HV** – 352 tvrdost dle Vickerse, měřeno při základních podmínkách zkoušky, zatížení 294,2 N (30 kp), doba působení zatížení 10 s až 15 s.
- **167 HV 10** – 167 tvrdost dle Vickerse, zatížení 98,1 N (10 kp) působící po dobu 10 s až 15 s.
- **243 HV 10/30** – 243 tvrdost dle Vickerse, zatížení 98,1 N (10 kp) působící po dobu 30 s.

2.2 Vrypové zkoušky

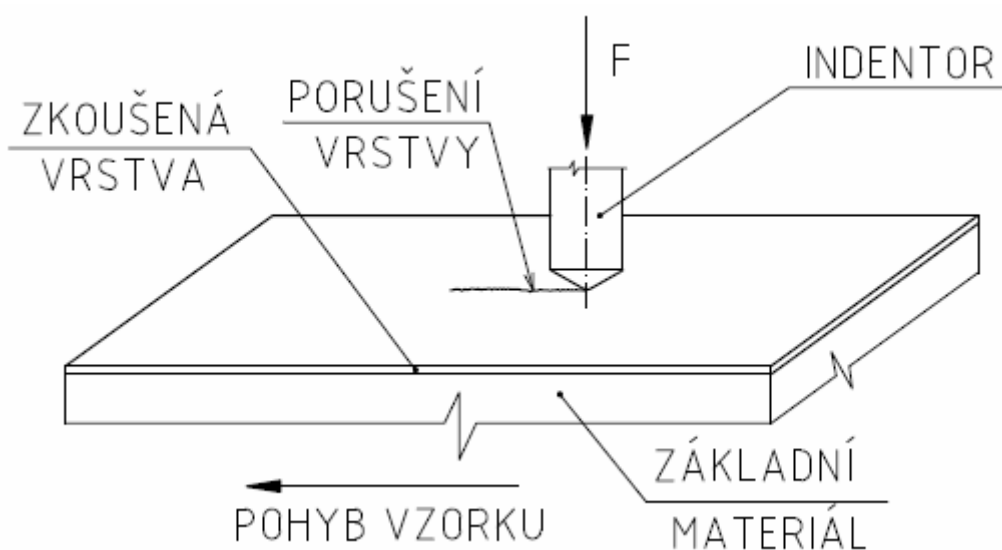
Vrypové zkoušky využívají principu Mohsovy stupnice tvrdosti minerálů. Autorem vrypové zkoušky je Martens. Vlastní zkouška spočívá v tažení diamantového kužele po povrchu zkoušeného materiálu. Kužel má vrcholový úhel 90° a poloměr špičky 0,2 mm. Je zatížen silou, která se plynule zvyšuje. [4, 5]

Hodnotu tvrdosti dle Martense vyjadřuje zatížení, při kterém dojde k vytvoření vrypu širokého 0,01 mm. Druhou možností je vytvoření vrypu při stejném zatížení a následné porovnání jeho šířky. Zkouška není normalizovaná a používá se jen ve speciálních případech. Modifikací Martensovy metody je tzv. scratch test. Využívá se k zjištění adhezivně-kohezivního chování velmi tenkých povrchových vrstev např. povlakovaných řezných nástrojů. [4, 5]

Tab. 2.7 Mohsova stupnice tvrdosti [5]

Mohsova stupnice tvrdosti		pořadí materiálu používaného ve strojírenství				
1. mastek	6. živec	grafit 0,5	cín 1,5	olovo 1,5	hliník 2	zlato 2,5
2. sůl kamenná	7. křemen	stříbro 2,5	antimon 3,5	čisté železo 4,5	platina 4,5	měkká ocel 5
3. vápenec	8. topas	iridium 6	tvrdá ocel 8,5	nitridovaný Povrch 9	slinuté karbidy 9,8	
4. kazivec	9. korund					
5. apatit	10. diamant					

Při scratch testu viz obrázek 2.13 se na určité délce vytváří vryp. Zatěžující síla narůstá od 0 do 1,96 N. Indentor je diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° a poloměrem zaoblání špičky 0,2 mm. Při scratch testu se určuje velikost zatížení, při kterém dojde k utržení vrstvy. [5]



Obr. 2.13 Princip scratch testu [7]

Rychlost posuvu materiálu pod hrotem je standardně $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a rychlost zvyšování síly $100 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$. Průměrná aritmetická úchylka profilu zkoušeného povrchu musí být maximálně $R_a 0,25 \text{ } \mu\text{m}$. Přístroj zaznamenává průběh tečné a normálové síly a signál akustické emise, který vzniká při tvorbě a šíření vnitřních trhlin. Povrch vrypu se vyhodnocuje pomocí optického nebo řádkovacího elektronového mikroskopu. Sledují se oblasti s adhezním i kohezním porušením vrstvy. [5]

3 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI

U dynamických zkoušek na materiál nepůsobí plynule rostoucí síla, zatížení je vyvozeno dynamicky, rázem. Nevýhodou dynamických zkoušek proti zkouškám statickým je menší přesnost naměřených hodnot.

Výhodou je, že tvrdoměry jsou malých rozměrů a dají se snadno přenášet. Zkoušky dynamické mají tedy uplatnění zejména v provozních podmínkách a při měření tvrdosti rozměrných součástí, které nelze zkoušet v laboratoři. Podle povahy deformace vzniklé ve zkoušeném materiálu se rozlišují zkoušky plastické a elastické.

3.1 Dynamicko – plastické zkoušky tvrdosti

Zkoušky jsou označovány jako plastické, protože cílem zkoušky je vytvořit trvalý vtisk, jehož rozměr slouží k vyhodnocení tvrdosti. Jako indenter u dynamicko – plastických zkoušek je nejčastěji využívána kulička. Nejpoužívanější metody jsou: zkouška kladívkem Poldi a Baumannovým kladívkem.

3.1.1 Zkouška tvrdosti kladívkem Poldi

Poldi kladívko je přenosný tvrdoměr o hmotnosti přibližně 0,5 kg. Souprava obsahuje vlastní tvrdoměr, etalon (porovnávací tyčinku), tabulky a lupu pro měření vtisku. Etalon je vyroben z oceli o pevnosti $R_m = 686,5$ MPa. Pokud by byl při zkoušení použit etalon o jiné pevnosti, je nutné výsledek měření zkorigovat. [2]

Přepočítávací koeficient pro jinou pevnost etalonu než 686,5 MPa [2]:

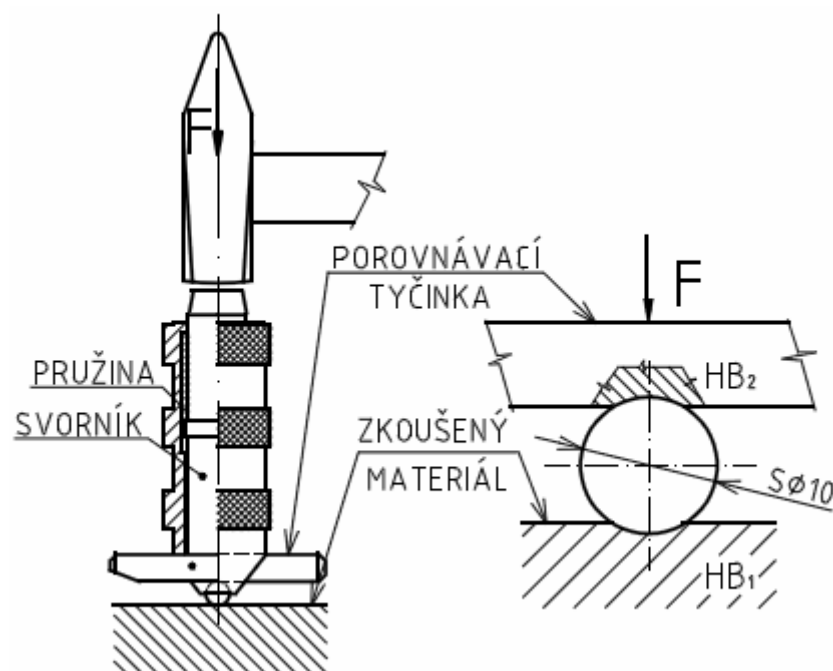
$$k = \frac{R_m}{686,5} \quad (3.1)$$

Jelikož se jedná o tvrdoměr s nízkou hmotností a malými rozměry je vhodné ho použít pro měření tvrdosti velmi rozměrných součástí.

Postup při měření tvrdosti Kladívkem Poldi

Před vlastním měřením je nutno zasunout porovnávací tyčinku do tvrdoměru a připravit si ruční kladivo, které není součástí soupravy. Po zasunutí tyčinky do tvrdoměru je tato přitlačována pružinou k indenteru. Indenter je kulička a její průměr je 10 mm. Tvrdoměr se přiloží kuličkou k povrchu zkoušeného materiálu a při tom je nutno dbát na to, aby osa tvrdoměru byla ke zkoušenému materiálu kolmá. Potom následuje úder ručním kladivem na úderník tvrdoměru.

Lupou je pak změřen průměr vtisku ve zkoušeném materiálu a v etalonu. Pomocí tabulek se z velikosti obou vtisků určí tvrdost zkoušeného materiálu. Síla úderu není pro stanovení tvrdosti podstatná. Při slabším úderu budou vtisky menší, při úderu silnějším větší. Jejich poměr však zůstává stejný. Princip měření kladívkem Poldi je na obrázku 3.1.



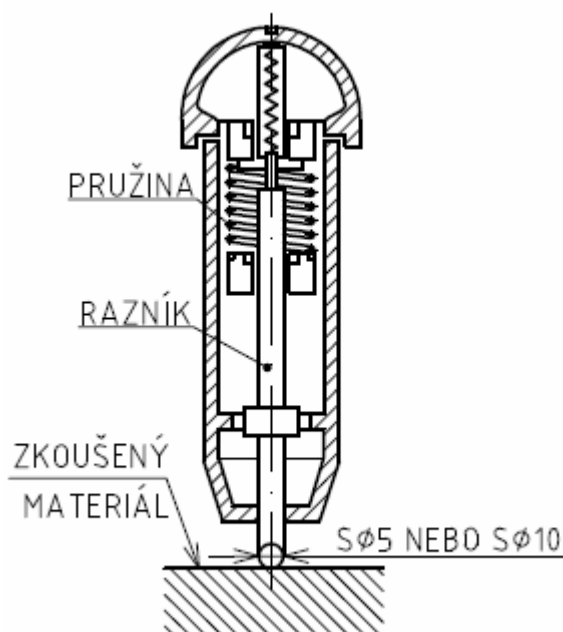
Obr. 3.1 Princip měření tvrdosti kladívkem Poldi [2, 5]

Příklad označení naměřené tvrdosti pomocí kladívka Poldi:

- **330 HB Poldi** – 330 tvrdost dle Brinella, měřeno kladívkem Poldi.

3.1.2 Zkouška tvrdosti Baumannovým kladívkem

Indentorem při zkoušce tvrdosti Baumannovým kladívkem je kulička a to buď o průměru 5 mm nebo 10 mm. Síla, která vtlačí indenter do zkoušeného materiálu je vyvolána uvolněním stlačené pružiny. Energie rázu je měnitelná. Pružina lze stlačit do dvou různých poloh. Princip Baumannova kladívka je naznačen na obrázku 3.2. [2]



Obr. 3.2 Princip měření tvrdosti Baumannovým kladívkem [2]

Postup při měření tvrdosti Baumannovým kladívkem

V případě, že zkoušený vzorek nemá dostatečnou hmotnost, pokládá se na masivní podložku o hmotnosti asi 40 kg. Na kladívku se nastaví velikost síly (velikost stlačení pružiny) a přiloží se kolmo k povrchu zkoušené součásti. Stačením zaobleného konce se pružina uvolní a vymrští razník s kuličkou, která vytvoří ve zkoušeném materiálu vtisk. [2]

Lupou se změří velikost vtisku a podle tabulek se na základě velikosti vtisku určí tvrdost. Protože je síla úderu pokaždé stejná není potřeba používat etalon ani korigovat výsledky.

Podobně jako tvrdoměr Poldi, je Baumannovo kladívko vhodné spíše do provozního prostředí. Hodnoty naměřené Baumannovým kladívkem nejsou tak přesné jako hodnoty naměřené Brinellovou metodou.

Příklad označení naměřené tvrdosti pomocí Baumannova kladívka:

- **350 HB Baumann** – 350 tvrdost dle Brinella, měřeno Baumannovým kladívkem.

3.2 Dynamicko – elastické zkoušky tvrdosti

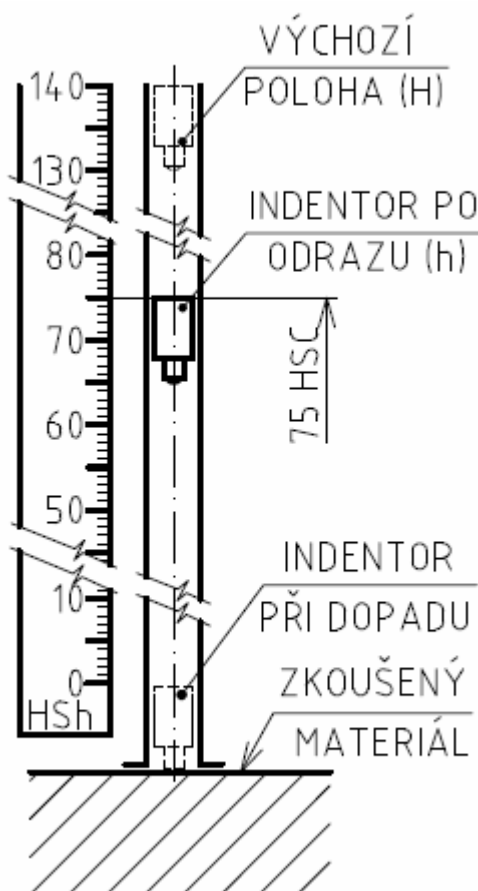
Pro měření tvrdosti lze využít elastické deformace zkoušeného tělesa. V zásadě je možno využít dva druhy metod, odrazovou metodu a metodu volným pádem. Protože při použití elastických zkoušek nevzniká trvalá deformace (případně je velmi malá), lze tyto zkoušky využít hlavně na součásti, na kterých je vytvoření vtisku nepřípustné. Přesnost zjištěných hodnot tvrdosti pomocí elastických metod není vysoká.

3.2.1 Zkouška tvrdosti Shoreho skleroskopem

Principem Shoreho skleroskopu je pád zkušebního tělíska ze stanovené výšky na povrch zkoušeného materiálu. Po dopadu tělíska z výšky H je toto odraženo zpět. Tělísko není schopno vrátit se do původní výšky H , ale pouze do výšky h . Tvrdost se tedy určuje z hodnoty potenciální energie ve výšce h . Princip měření tvrdosti Shoreho skleroskopem na obrázku 3.3.

Postup při měření tvrdosti Shoreho skleroskopem

Povrch zkoušeného materiálu musí být hladký a tělísko nesmí dopadat vícekrát na stejné místo. Hodnoty získané pomocí Shoreho skleroskopu nejsou velmi přesné (např. kvůli tření ve vedení). Metoda se používá především pro velmi tvrdé materiály a měkké elastické materiály. V současné době má Shoreho metoda dvě stupnice HSC a HSD [2, 4, 10]



Obr. 3.3 Princip měření tvrdosti Shoreho skleroskopem [5]

Stupnice HSC:

Zkušební tělísko má hmotnost 2,5 g, část která přichází do kontaktu se zkoušeným materiálem je kulovitě vybroušený diamant s poloměrem zaoblení 1 mm. Pád je realizován z výšky 254 mm (10"). Pád probíhá v kalibrované trubce, která slouží tělísku jako vedení. Stupnice je umístěna za trubicou. Je rozdělena na 140 dílků, kde 100 dílků představuje tvrdost vysokouhlíkové oceli zakalené na martenzitickou strukturu. Po ukončení zkoušky, se výška odskoku určuje pomocí lupy. [2, 4]

Vztah pro výpočet tvrdosti podle Shoreho, stupnice HSC [9]:

$$HSC = \frac{10^4 \cdot h}{65 \cdot H} \quad (3.2)$$

Stupnice HSD:

U stupnice HSD má zkušební tělísko hmotnost 36,2 g. Pád tělíska na vzorek se provádí z výšky 19 mm. Provedení a vyhodnocení zkoušky je stejné jako u stupnice HSC. [9]

Vztah pro výpočet tvrdosti podle Shoreho, stupnice HSD [9]:

$$HSD = \frac{140 \cdot h}{65 \cdot H} \quad (3.3)$$

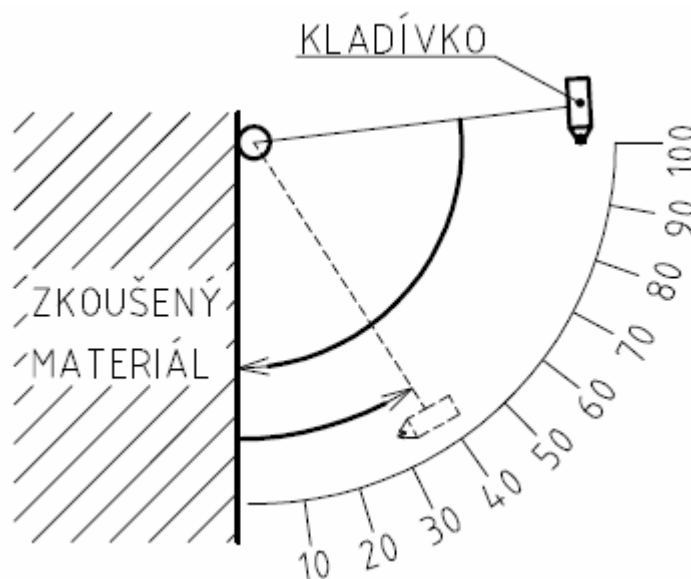
„U moderních přístrojů pro dynamické zkoušky tvrdosti se používají tělíska o jiném tvaru i hmotnosti než u původní metody a k udělení počáteční energie se využívá energie pružiny nebo elektromagnetického pole. Vyhodnocení je prováděno výlučně elektronicky s možností přepočtu na jiné stupnice tvrdosti. Přesnost měření závisí na mnoha faktorech, jako je hladkost povrchu, kolmost dopadu tělíska, hmotnosti zkoušeného předmětu a také především na modulu pružnosti zkoušeného materiálu, takže porovnávat lze výsledky měření jen u materiálů s přibližně stejným modulem pružnosti.“ [9]

Příklad označení naměřené tvrdosti pomocí Shoreho skleroskopu:

- **82 HSh** – Tvrdost 82, měřeno Shoreho skleroskopem.

3.2.2 Zkouška tvrdosti kyvadlovou metodou (duroskopem)

Metoda se používá pro měření tvrdosti svislých ploch. Zařízení pro zkoušení touto metodou se nazývá duroskop. Zkušební kladívko má v sobě upevněnou kuličku, která naráží do zkoušeného předmětu. Kladívko padá neustále ze stejné výšky (úhlu). Po nárazu je vymrštěno opačným směrem. Při odrazu kladívko zachytne ručičku, která zaznamená výšku (úhel) odrazu. Výška (úhel) odrazu je mírou tvrdosti. Výsledná tvrdost se pomocí vlečené ručičky odečítá přímo na stupnici tvrdoměru. Princip měření duroskopem je zobrazen na obrázku 3.4. [2, 4]



Obr. 3.4 Princip měření tvrdosti duroskopem [2]

Stejně jako Shoreho metoda je duroskop velmi nepřesný.

Příklad označení naměřené tvrdosti duroskopem:

- **82 HSh** – Tvrdost 82, měřeno duroskopem.

4 ZKOUŠKY MIKROTVRDOSTI

Zkoušky jsou principiálně stejné jako statické zkoušky makrotvrdosti. Rozdíl oproti zkouškám makrotvrdosti je především ve velikostech zatěžujících sil. První experiment se zatěžující silou nižší než 10 N byl proveden v roce 1932 ve Velké Británii. Snižování zátěžných sil má za následek i snížení velikosti vtisku. [3]

Zkoušky mikrotvrdosti jsou vhodné pro [3]:

- malé nebo tenké součásti,
- měření tvrdosti strukturních složek a fází,
- měření tvrdosti tenkých povlaků,
- hodnocení svarů,
- měření křehkých materiálů,
- studium difúzních pochodů,
- zjištění rozdílů tvrdosti mezi hranicemi a vnitřky zrn.

4.1 Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse

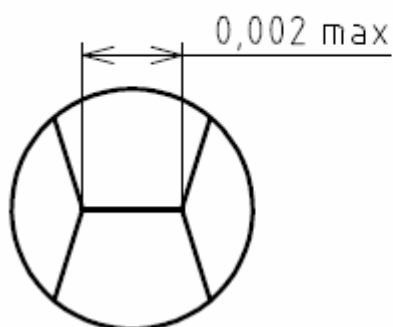
Zkoušku popisuje evropská norma ČSN EN ISO 6507 – 1. Norma je podle velikosti zatěžujících sil rozdělena na tři části viz tabulka 4.1.

Tab. 4.1 Rozdělení zkoušek dle Vickerse [5]

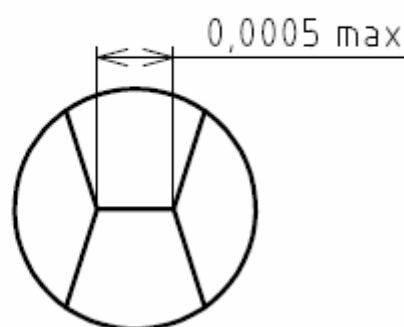
oblast zkušebního zatížení [N]	symbol tvrdosti	ISO 6507 – 1
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	$HV 0,2 \text{ až } < HV 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení
$0,09807 \leq F < 1,961$	$HV 0,01 \text{ až } < HV 0,2$	Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse

Indentor se téměř neliší od klasického pro měření makrotvrdosti dle Vickerse, difference (délka příčného ostří) je zobrazena na obrázku 4.1.

INDENTOR PRO MĚŘENÍ
MAKROTVRDOSTI



INDENTOR PRO MĚŘENÍ
MIKROTVRDOSTI



Obr. 4.1 Rozdíl mezi indentory pro makrotvrdost a mikrotvrdost [4]

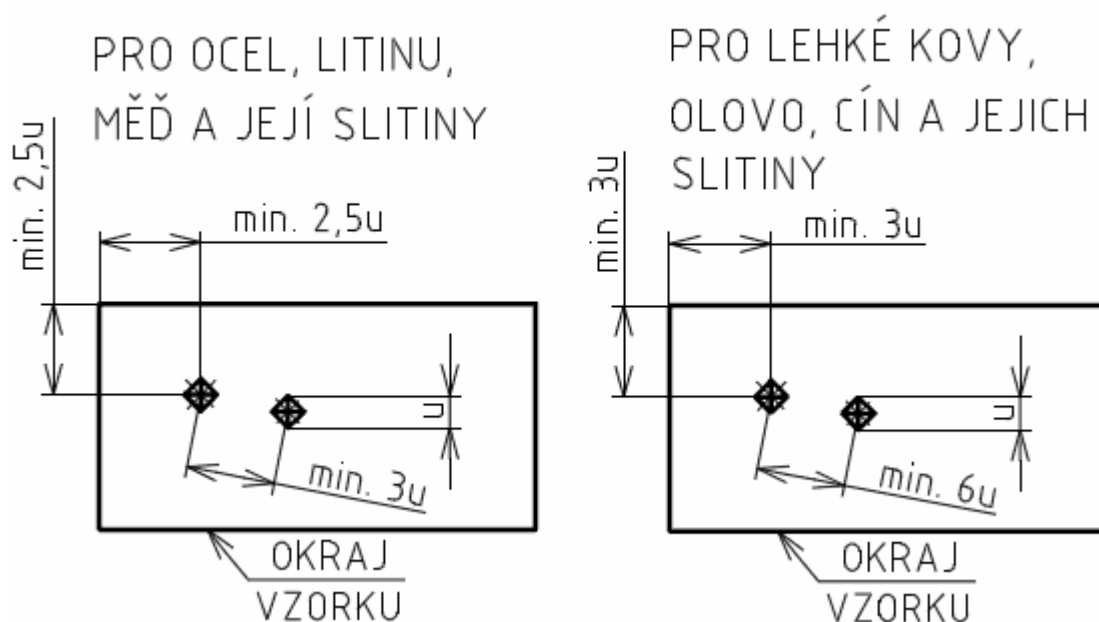
Při měření mikrotvrdomosti se využívá nízkých zatěžujících sil. Nízké síly mají za následek velmi malé vtisky, které se obtížněji měří. Zkoušený povrch musí být velmi dobře upraven (jako metalografický výbrus). Další nevýhodou je, že vtisky si již nezanedávají geometrickou podobnost, výsledná tvrdost je závislá na velikosti působící síly. Výsledné hodnoty nelze porovnávat s klasickou zkouškou makrotvrdomosti podle Vickerse. V tabulce 4.2 jsou uvedeny hodnoty zkušebních zatížení pro měření mikrotvrdomosti podle Vickerse. [3, 4]

Tab. 4.2 Zkušební zatížení pro zkoušku tvrdosti dle Vickerse [3]

zkouška tvrdosti při nízkém zatížení		zkouška mikrotvrdomosti	
symbol tvrdosti	nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	symbol tvrdosti	nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,09807
HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,1471
HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,1961
HV 1	9,807	HV 0,025	0,2942
HV 2	19,61	HV 0,05	0,4903
HV 3	29,42	HV 0,1	0,9807

Nároky na správný průběh zkoušky

Tloušťka měřené součásti musí být minimálně 1,5 násobek délky úhlopříčky vtisku. Zkoušený materiál musí být uložen na tuhé podložce, aby u průběhu zkoušky nedošlo k jeho posunutí. Indentor musí směřovat kolmo k povrchu vzorku. Doba od počátku zatěžování až do maximální zátěžné síly musí být v intervalu od 2 s do 8 s. Rychlost zatěžování nesmí překročit $0,2 \text{ mm.s}^{-1}$. Minimální vzdálenosti mezi vtisky a mezi vtiskem a okrajem jsou zobrazeny na obrázku 4.2. [3]



Obr. 4.2 Minimální vzdálenosti mezi vtisky a mezi vtiskem a okrajem [9]

Vztah pro výpočet mikrotvrdosti podle Vickerse [4]:

$$HV = \frac{0,1891 \cdot F}{u^2} \quad (4.1)$$

Označení naměřené mikrotvrdosti dle Vickerse:

Tab. 4.3 Posloupnost parametrů v označení mikrotvrdosti dle Vickerse

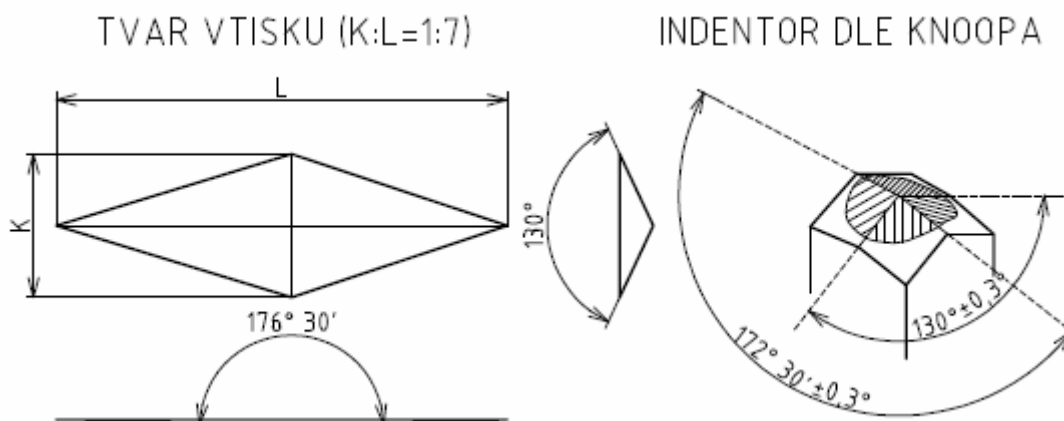
$X HV F/t$
X – naměřená hodnota mikrotvrdosti [-]
HV – Vickersovo tvrdostní číslo (hardness Vickers)
F – zátěžná síla [kp]
t – doba působení zatížení [s], pokud je $t = 10$ s až 15 s neuvádí se

Příklady označení naměřené mikrotvrdosti dle Vickerse:

- **62,5 HV 0,001** – 62,5 mikrotvrdost dle Vickerse, měřeno při základních podmínkách zkoušky, zatížení 0,0098 N (0,001 kp), doba působení zatížení 10 s až 15 s.
- **273,9 HV 0,1/30** – 273,9 mikrotvrdost dle Vickerse, zatížení 0,98 N (0,1 kp) působící po dobu 30 s.

4.2 Zkouška mikrotvrdosti podle Knoop

Knoopova metoda byla vytvořena v roce 1939 v USA. Zkouška vychází z Vickersovy metody. Indentorem je diamantový jehlan, jehož základnou je protáhlý kosočtverec. Výsledný vtisk má poměr úhlopříček přibližně 1:7 viz obrázky 4.3. Zkouška mikrotvrdosti dle Knoop je popsána mezinárodní normou ČSN ISO 4545. [3, 5]



Obr. 4.3 Tvar vtisku vytvořený metodou dle Knoop [2, 8]

Po provedení vtisku, se neměří délky obou úhlopříček, ale pouze ta delší (L). Největší deformace vznikají u úhlopříčky kratší, při odlehčení je v tomto směru největší odpružení. Naopak odpružení je minimální ve směru delší úhlopříčky. S výhodou lze měřit tvrdost drátů, kde má vtisk úhlopříčku L rovno-

běžně s jeho osou. Velikosti zkušebních zatížení pro měření mikrotvrdosti podle Knoop jsou uvedeny v tabulce 4.4. [5]

Vztah pro výpočet mikrotvrdosti dle Knoop [3]:

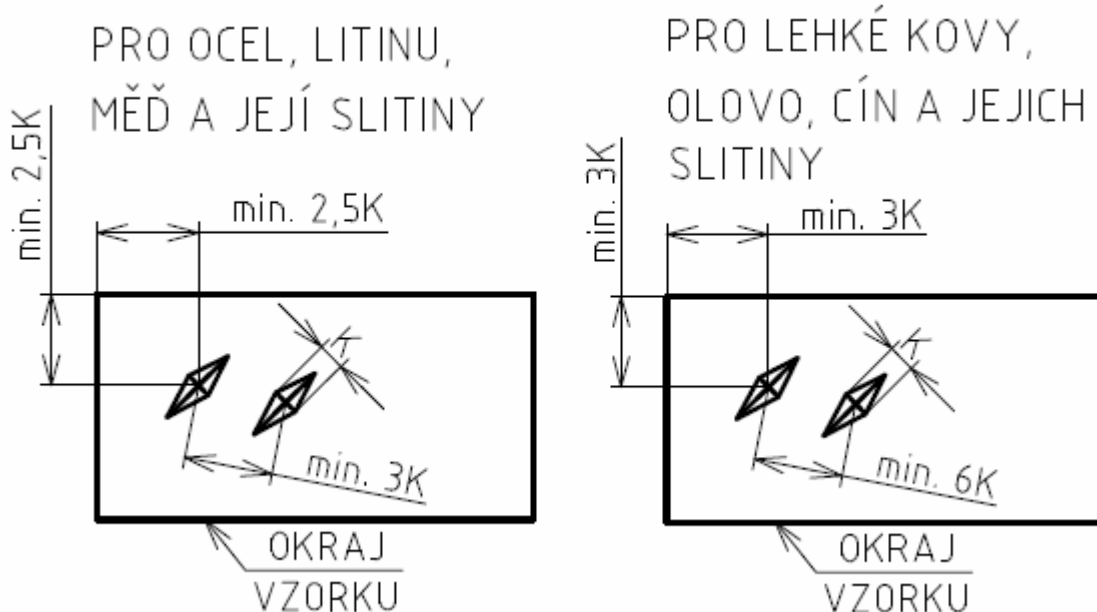
$$HK = \frac{1,451 \cdot F}{L^2} \quad (4.2)$$

Tab. 4.4 Velikosti zkušebních zatížení při měření tvrdosti dle Knoop [3]

mikrotvrdost dle Knoop	
symbol tvrdosti	nominální hodnota zkušebního ztížení F [N]
HK 0,01	0,09807
HK 0,02	0,1961
HK 0,025	0,2452
HK 0,05	0,4903
HK0,1	0,9807
HK 0,2	1,961
HK 0,3	2,942
HK 0,5	4,903
HK 1	9,807

Nároky na správný průběh zkoušky

Povrch zkoušeného materiálu musí být připraven jako metalografický výbrus. Vzorek musí být uložen na tuhé podložce, aby při zkoušce nedošlo k jeho posunutí. Indentor je vtlačován kolmo k povrchu vzorku. Doba zatěžování od nuly až do nominální hodnoty nesmí překročit 10 s. Minimální potřebné vzdálenosti mezi vtisky a mezi vtiskem a okrajem vzorku jsou znázorněny na obrázku 4.4. [3]



Obr. 4.4 Minimální vzdálenosti mezi vtisky a mezi vtiskem a okrajem [9]

Označení naměřené tvrdosti dle Knoop:

Tab. 4.5 Posloupnost parametrů v označení mikrotvrdosti dle Knoop

$X\ HK\ Ft$
X – naměřená hodnota tvrdosti [-] HK – Knoopovo tvrdostní číslo (hardness Knoop) F – zátěžná síla [kp] t – doba působení zatížení [s], pokud je $t = 10\ s$ až $15\ s$ neuvádí se

Příklady označení naměřené mikrotvrdosti dle Knoop:

- **620,5 HK 0,1** – 62,5 mikrotvrdost dle Knoop, měřeno při základních podmínkách zkoušky, zatížení 0,0098 N (0,001 kp), doba působení zatížení 10 s až 15 s.
- **653,9 HK 0,1/20** – 273,9 mikrotvrdost dle Knoop, zatížení 0,98 N (0,1 kp) působící po dobu 20 s.

5 ZKOUŠKY NANOTVRDOSTI

Pokud budeme dále snižovat velikost sil, používaných při měření mikro-tvrdomosti dostaneme se do oblasti zvané nanotvrdomost. Velikost sil při těchto zkouškách může být až 1 nN a hloubka vtisku 0,1 nm. Provádí se zkouška z níž lze získat závislost působícího zatížení a hloubky vtisku. Záznam velikosti zatížení a hloubky vtisku lze dále využít ke studiu dalších vlastností materiálu jako modul pružnosti v tahu nebo lomová houževnatost. [3]

Indentory jsou vyráběny především z diamantu (kvůli vysokému modulu pružnosti). Vickersův jehlan se při zkoušení nanotvrdomosti již nepoužívá, důvodem je jeho příčné ostří viz obrázek 4.1. Nejčastěji se využívá trojboký jehlan dle Berkoviche. Berkovichův jehlan zachovává stejný poměr hloubky a plochy vtisku. Narozdíl od jehlanu dle Vickerse lze u Berkovichova jehlanu vybrousit špičku do bodu. Tím je zaručena geometrická podobnost vtisků. Kromě jehlanu lze ke zkoušení nanotvrdomosti využít, také kuličku nebo hrot ve tvaru rohu krychle, případně i jiné. [3]

Použití kuličky je výhodné z hlediska možnosti sledovat postupný nárůst nejprve elastických a následně plastických deformací. Zkouška umožňuje vyhodnotit mez kluzu a zpevňování vzorku. Nevýhodou kuličky, je její velmi pracná výroba, proto je nejvíce rozšířena Berkovichova metoda. [3]

Jako další typ indentoru lze použít hrot, který má tvar rohu krychle. Tento hrot vyvolá ve zkoušeném materiálu větší napětí a protože je ostřejší vyvolá u křehčích materiálů mikrotrhliny. Mikrotrhliny lze využít při hodnocení lomové houževnatosti. U indentorů tvaru kužele nedochází ke koncentraci napětí na ostrých hranách (krychle, jehlan). Jako u kuličky je u kužele problém s výrobou (bodové zakončení kužele). [3]

Princip zkoušení nanotvrdomosti je obdobný jako u klasických statických vnikacích zkoušek. Indentor je vtlačován kolmo k povrchu zkoušeného materiálu. Ve vzorku vzniknou nejprve elastické a následně plastické deformace. Tvar vtisku se liší podle zvoleného indentoru, nepoužívanější je trojboký jehlan dle Berkoviche. [3]

Výše popsané metody jsou ještě velmi mladé. Pro měření nanotvrdomosti je nutno mít speciální přístroje a zařízení. Využití zkoušek nanotvrdomosti je především ve zkoumání materiálů a vyhodnocování jejich vlastností.

6 ZÁKLADY STATISTIKY A CHYBY MĚŘENÍ

Protože při měření vzniká celá řada chyb, proto je nutné výsledky měření vyhodnotit statisticky. Pro určení nej přesnější hodnoty měřené veličiny by bylo nutno provést měření, kde by se počet změřených hodnot blížil k nekonečnu. Na strojírenské rozlišovací úrovni však není potřeba provádět takové množství měření.

Počet měření (rozsah statistického souboru) je závislý na přesnosti zvolené metody měření tvrdosti. U přesných metod lze realizovat tři měření a výslednou hodnotu vyhodnotit jako aritmetický průměr. U méně přesných metod je zapotřebí opakovat měření vícekrát.

Další faktor na kterém je závislý rozsah statistického souboru je účel měření. Pro přibližné (informativní) určení tvrdosti stačí jeden nebo dva vtisky. Při měření tvrdosti pro výzkumné účely, je nutné zvolit velký rozsah statistického souboru a případně celé měření opakovat několikrát.

6.1 Základní vztahy a pojmy statistiky

Základní pojmy ze statistiky [11]:

- **statistický soubor** – množina prvků s určitými shodnými vlastnostmi,
- **rozsah statistického souboru N** – počet pozorování (měření),
- **statistický znak x** – parametr, který je předmětem zkoumání,
- **hodnoty znaku** – konkrétní výsledky měření, značí se x_1, x_2, \dots, x_n ,
- **absolutní četnost** – číslo udávající kolikrát se vyskytuje hodnota znaku x_i ve statistickém souboru,
- **relativní četnost** – absolutní četnost podělená rozsahem souboru N . Součet všech relativních četností je roven 1,
- **medián znaku** – prostřední hodnota znaku, jestliže jsou naměřené hodnoty seřazeny vzestupně nebo sestupně,
- **rozpětí** – rozmezí ve kterém se pohybují naměřené hodnoty.

Aritmetický průměr (výběrový) [11]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.1)$$

Směrodatná odchylka aritmetického průměru (výběrová) [11]:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.2)$$

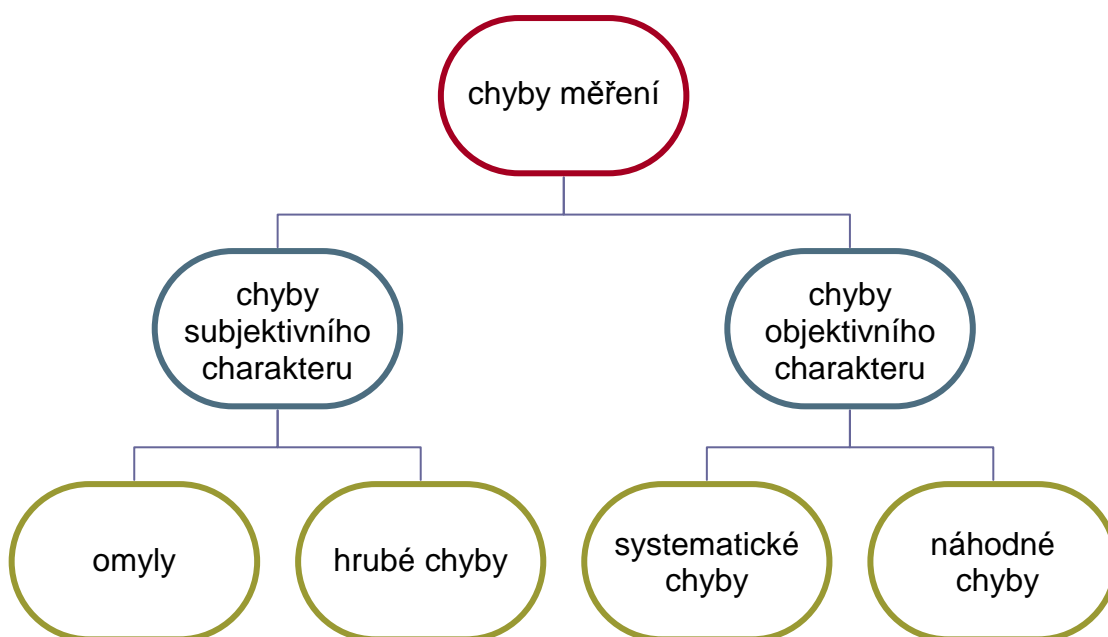
Směrodatná odchylka aritmetického průměru (základního souboru) [11]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.3)$$

6.2 Chyby měření

Při měření vznikají chyby. Žádné měřidlo ani měřicí přístroj není schopen určit přesnou hodnotu měřené veličiny. Protože již komponenty ze kterých je měřicí zařízení sestaveno jsou vyrobeny s nepřesností (ve výrobní toleranci) budou též výsledky měření zatíženy určitou nepřesností. Výrobce měřicího zařízení musí specifikovat rozsah nepřesnosti která může při měření nastat.

Další chyby při měření tvrdosti mohou vzniknout ovlivněním struktury vzorku při jeho přípravě. Nepřesnosti mohou být také spojeny s neodborným obsluhovááním tvrdoměru nebo nedodržením pokynů uvedených v normě příslušné zkoušky. Na obrázku 6.1 je uvedeno rozdělení chyb vznikajících při měření.



Obr. 6.1 Klasifikace chyb, které vznikají při měření [12]

Absolutní chyba měření je vyjádřena jako rozdíl mezi výsledkem měření a pravou hodnotou měřené veličiny. V praxi není však možné pravou hodnotu zjistit, proto je nahrazena konvenčně pravou. Konvenčně pravá se získá metodami, které jsou řádově třikrát přesnější. [12]

Absolutní chyba měření [12]:

$$\Delta = x_m - x_p \quad (6.4)$$

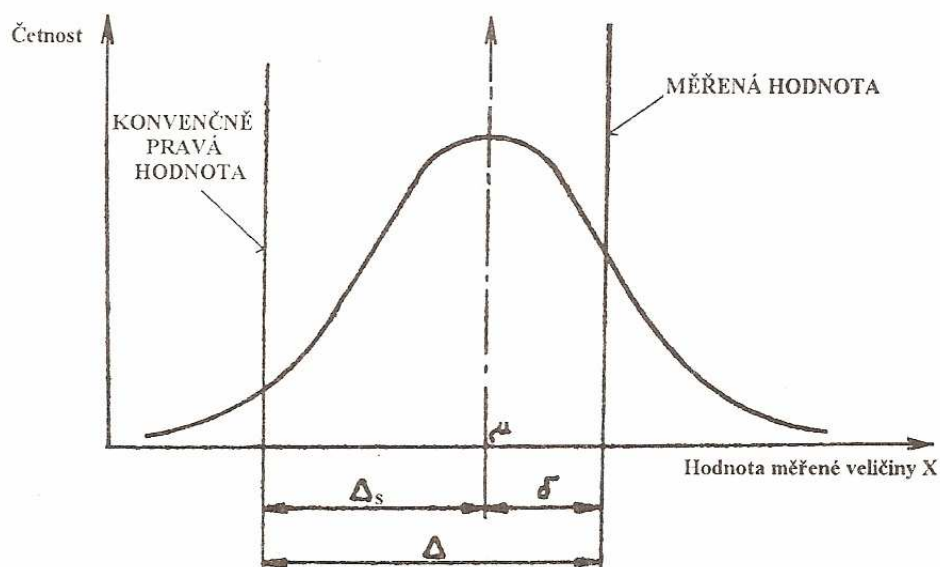
Definice chyb objektivního charakteru:

- **„Náhodná chyba** je výsledek měření minus střední hodnota, která by vznikla z nekonečného počtu měření téže měřené veličiny uskutečněné za podmínek opakovatelnosti. V praxi lze provést pouze odhad náhodné chyby.“ [12]
- **„Systematická chyba** je střední hodnota, která by vznikla z nekonečného počtu měření téže měřené veličiny, uskutečněných za podmínek opakovatelnosti, od které se odečte pravá hodnota měřené veličiny.“ [12]

Absolutní chyba měření [12]:

$$\Delta = \Delta_s + \delta \quad (6.5)$$

Na obrázku 6.2 je zobrazena grafická interpretace náhodné chyby (δ) a chyby systematické (Δ_s).



Obr. 6.2 Grafické vyjádření chyby měření [12]

Při měření se chyby zpravidla řídí normálním (Gaussovým) rozdělením.

Hustota pravděpodobnosti (Gaussova funkce) [12]:

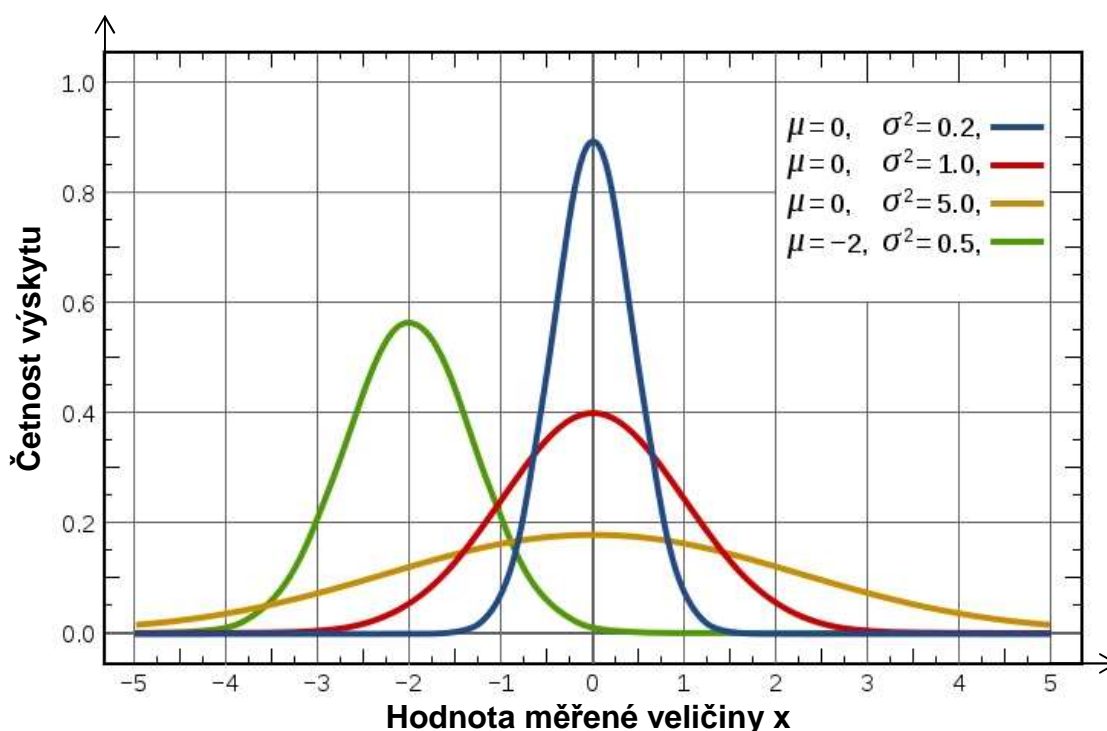
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad x \in (-\infty, \infty), \quad \mu > 0 \wedge \sigma > 0 \quad (6.6)$$

Na obrázku 6.3 jsou vykresleny průběhy normálního rozdělení. Z obrázku plyne, že grafy jsou symetrické podle svislé osy. Osa každého grafu protíná vodorovnou osu (na níž jsou vyneseny změřené hodnoty) v souřadnici $[\mu, 0]$. Hodnota μ je aritmetický průměr a vyjadřuje nejpravděpodobnější hodnotu měření. Tvar je závislý na velikosti rozptylu σ^2 , ten vyjadřuje míru rozptýlenosti daných měření.

Pokud je $\mu = 0$ a $\sigma = 1$ jedná se normované normální rozdělení. Na obrázku 6.3 je vykresleno červenou barvou.

Normované normální rozdělení má hustotu pravděpodobnosti [12]:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}, \quad x \in (-\infty, \infty), \quad \mu = 0 \wedge \sigma = 1 \quad (6.7)$$

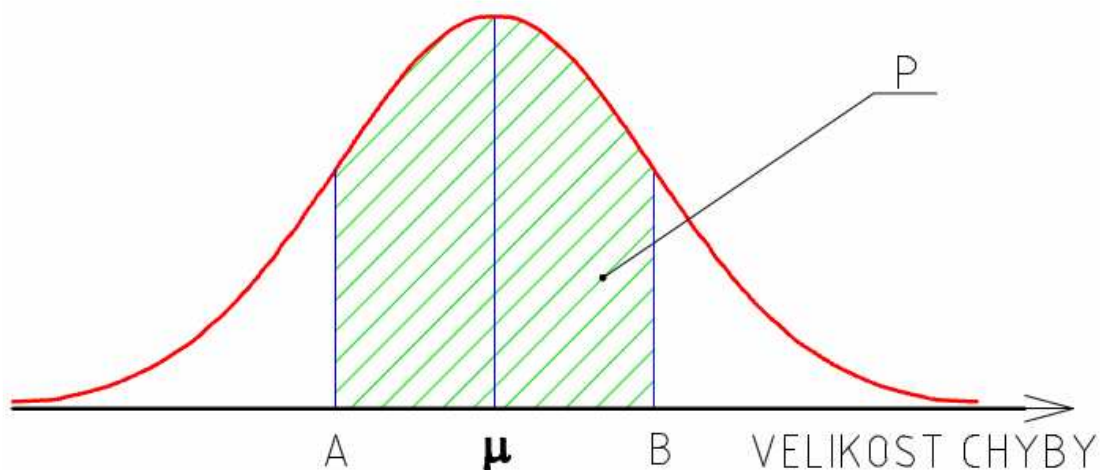


Obr. 6.3 Grafy hustot normálního rozdělení v závislosti na parametrech μ a σ^2 [14]

Pravděpodobnost, že náhodná veličina x leží v intervalu $\langle A, B \rangle$ [16]:

$$P = \int_A^B f(x) dx \quad (6.8)$$

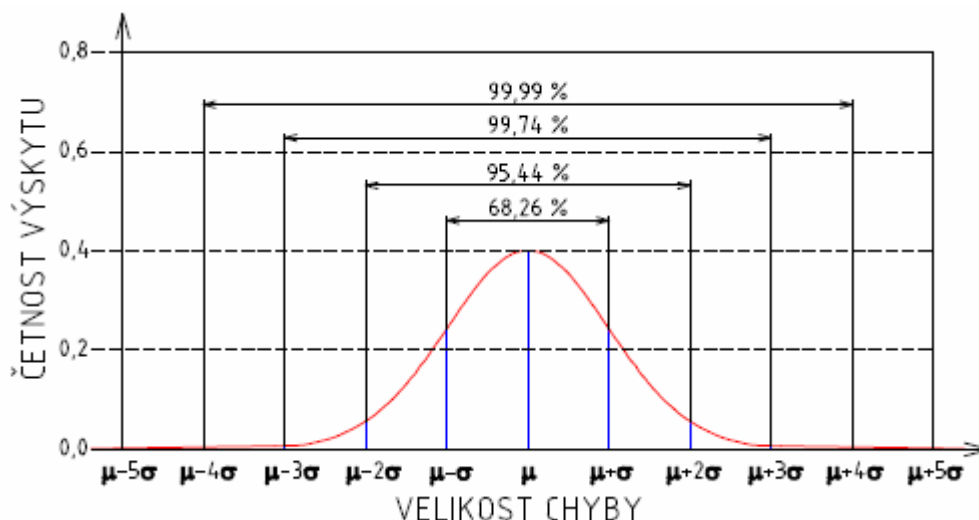
Pomocí vztahu (6.8) lze určit pravděpodobnost, že vznikne při měření chyba o velikosti padnoucí do intervalu $\langle A, B \rangle$. Pravděpodobnost je pak rovna ploše, která je vymezena intervalem $\langle A, B \rangle$ a křivkou normálního rozdělení viz obrázek 6.4. Výsledná pravděpodobnost P je tedy rovna vyšrafované ploše. [16]



Obr. 6.4 Grafická interpretace pravděpodobnosti výskytu náhodné veličiny x

Na obrázku 6.5 je zobrazeno normální rozdělení. Na vodorovné ose jsou velikosti chyb vzniklých při měření. Na ose svislé jsou pak vyneseny četnosti jejich výskytu při měření.

Z obrázku 6.5 je patrné, že se chyby vyskytují jak se záporným tak s kladným znaménkem a to se stejnou pravidelností. Dále lze z obrázku vyčíst, že velké chyby se vyskytují při měření méně často, naproti tomu chyby malé se při měření vyskytují mnohem častěji. Lze tedy tvrdit, že s rostoucí velikostí chyby se snižuje četnost jejího výskytu.



Obr. 6.5 Rozložení pravděpodobnosti [13]

V obrázku 6.5 jsou též zakótovány pravděpodobnosti výskytu chyb padnoucích do vyznačených intervalů. Přesnější hodnoty pravděpodobností jsou uvedeny v tabulce 6.1.

Tab. 6.1 Pravděpodobností výskytu veličiny x v uvedeném rozsahu [15]

rozsah	pravděpodobnost výskytu v rozsahu
$\mu \pm 1\sigma$	0,682689492137
$\mu \pm 2\sigma$	0,954499736104
$\mu \pm 3\sigma$	0,997300203937
$\mu \pm 4\sigma$	0,999936657516
$\mu \pm 5\sigma$	0,999999426697
$\mu \pm 6\sigma$	0,999999998027

7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části byla prováděna čelní zkouška prokalitelnosti (Jominiho zkouška). Zkouška byla prováděna na dvou vzorcích z oceli 14 109 (1.3505, 100Cr6) a dvou vzorcích z oceli 12 040 (1.1181, C35E).

7.1 Čelní zkouška prokalitelnosti

Princip čelní zkoušky prokalitelnosti spočívá v ohřevu zkušební tělesa na kalicí teplotu a následném zakalení čelní plochy válcového zkušební tělesa. Chladicí médium je voda. Po zakalení se povrch zkušební tělesa vhodně připraví pro měření tvrdosti. Tvrdost se měří v bodech, jejichž vzdálenost od kalené čelní plochy určuje norma zkoušky ČSN EN ISO 642.

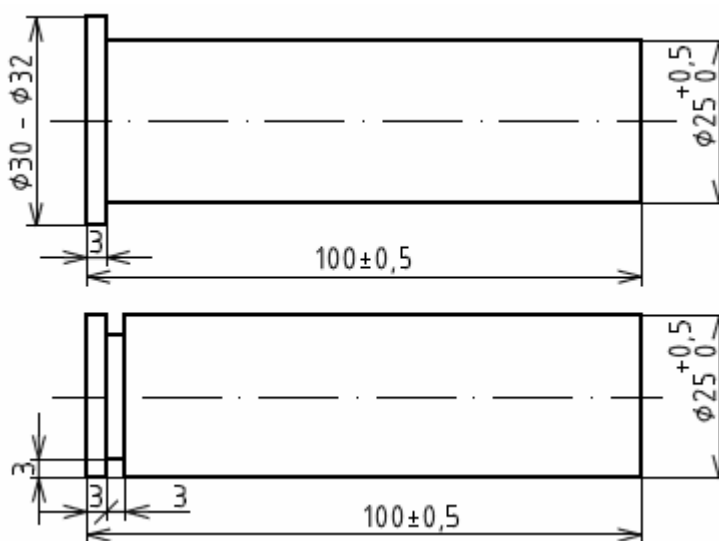
Z výsledků měření je pak sestavena závislost tvrdosti na vzdálenosti od kalené čelní plochy. Pomocí dvou mezních křivek je pak určen tzv. pás prokalitelnosti.

Základní pojmy spojené s čelní zkouškou prokalitelnosti:

- **zakalitelnost** – „Zakalitelnost je schopnost materiálu při ochlazování nad kritickou rychlost přejít a setrvat v metastabilním stavu, tj. u ocelí získat martenzitickou strukturu. Protože obvykle se bere tvrdost jako měřítko kaleného stavu, je zakalitelnost dána maximální tvrdostí povrchu výrobku“ [6]
- **prokalitelnost** – „Prokalitelností se rozumí schopnost oceli dosáhnout při kalení tvrdosti (martenzitické struktury) do určité hloubky pod povrch výrobku. Za prokalenou se obvykle považuje vrstva, která má tvrdost odpovídající struktuře o minimálně 50 % martenzitu“ [6]

7.1.1 Zkušební těleso

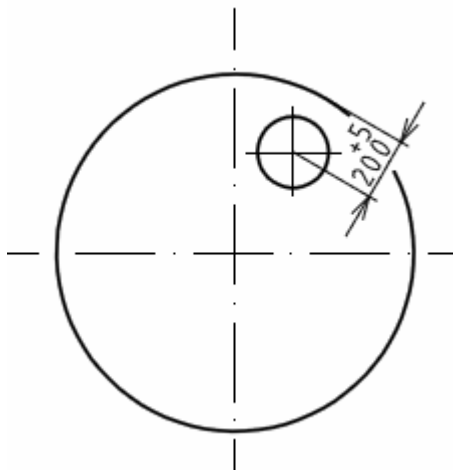
Zkušební těleso je válcového tvaru. Na straně která nebude kalena je zhotoven upínací prvek (zápich nebo osazení) Tvar a rozměry zkušební tělesa jsou zobrazeny na obrázku 7.1.



Obr. 7.1 Tvar, rozměry zkušební tělesa a odběr zkušební tělesa obráběním [13]

Odběr zkušebního tělesa z výrobku lze provést [13]:

- válcováním za tepla nebo kováním tělesa o průměru 30 mm až 32 mm,
- obráběním tělesa o průměru $(25^{+0,5}_0)$ mm, jehož osa musí být vzdálena od povrchu polotovaru (20^{+5}_0) mm viz obrázek 7.2.



Obr. 7.2 Minimální vzdálenost osy vzorku od povrchu polotovaru [13]

Čelní plocha, která nebude kalena má průměr 30 mm až 32 mm, případně 25 mm podle typu zkušebního tělesa. Lze na ní provést vyražení označení pro pozdější identifikaci zkušebního tělesa. [13]

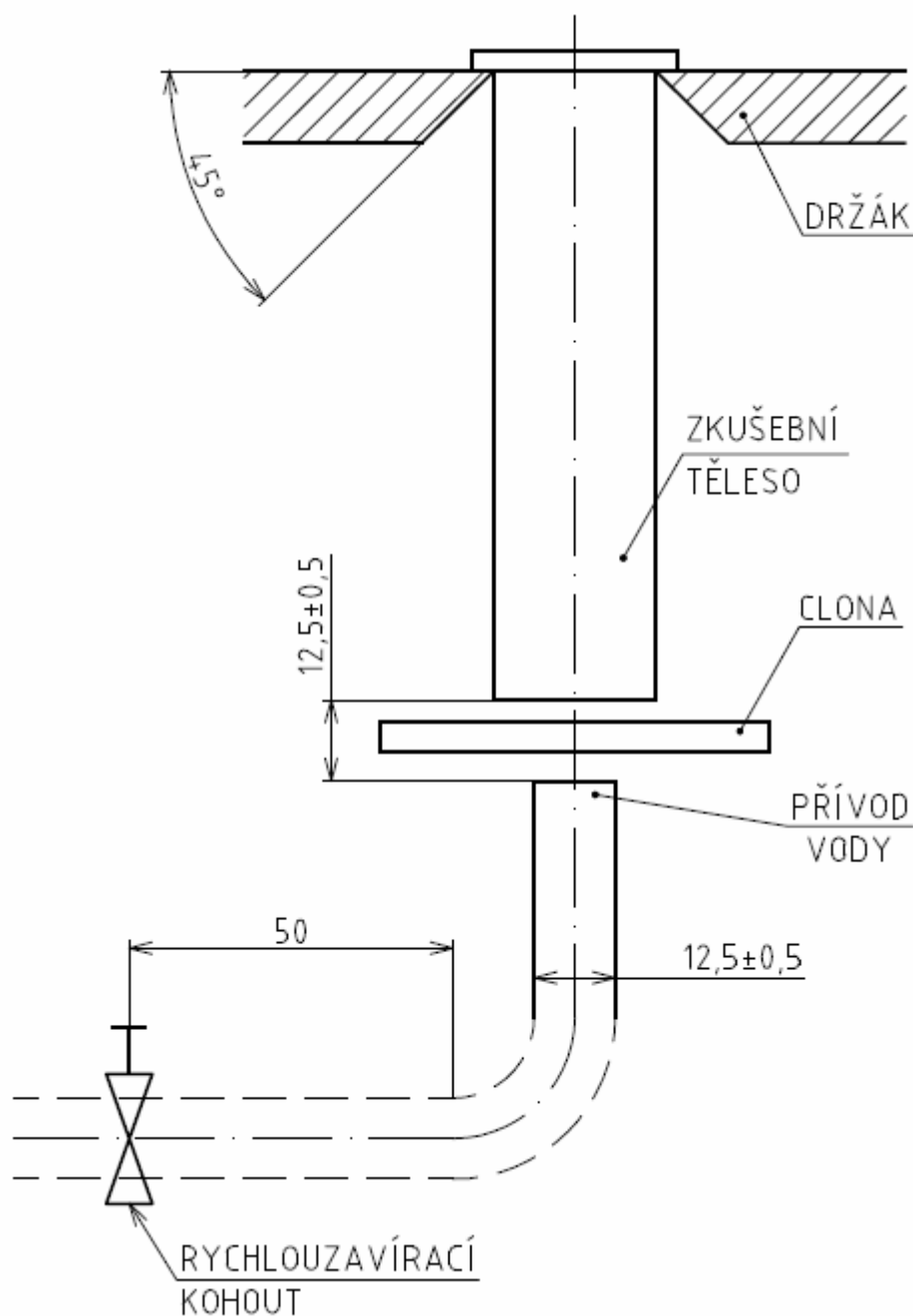
Zkušební těleso se před opracováním a kalením musí normalizačně žíhat (pokud není dohodnuto jinak). Normalizační žíhání je provedeno podle specifikací materiálového listu. Výdrž na žíhací teplotě musí být (30^{+5}_0) minut. Tepelné zpracování je nutno provést tak, aby zkušební těleso po konečném opracování nevykazovalo žádné známky oduhličení. [13]

Zkušební těleso musí být obrobena jemným soustružením a čelní plocha, která bude kalena je obrobena jemným broušením. [13]

7.1.2 Ohřev a kalení zkušebního tělesa

Ohřev zkušebního tělesa musí být při teplotě odpovídající kalicí teplotě z materiálového listu. Ohřev na kalicí teplotu musí být po dobu minimálně 20 minut, výdrž na kalicí teplotě po dobu (30^{+5}_0) minut. Při ohřevu a výdrži se musí zamezit výrazné oxidaci a tvorbě okují. Oduhličení a nauhličení musí být minimální. [13]

Doba mezi vyjmutím zkušebního tělesa z pece a začátkem kalení nesmí přesáhnout 5 s. Při vyjímání zkušebního tělesa z pece a uložení držáku se toto drží pomocí kleští a to na straně příruby nebo zápichu. Doba kalení musí být nejméně 10 minut. Po oplynutí této doby je možno dosáhnout úplného ochlazení zkušebního tělesa jeho ponořením do studené vody. Schéma kalicího zařízení je zobrazeno na obrázku 7.3. [13]



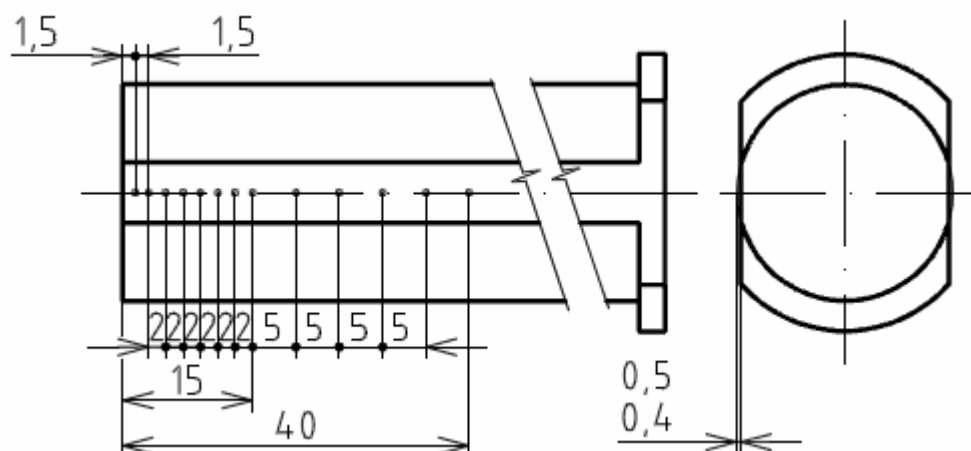
Obr. 7.3 Schéma kaliciho zařízení [13]

7.1.3 Měření tvrdosti a vyhodnocení zkoušky

Před vlastním měřením tvrdosti je nutno vhodně připravit povrch zkušebního tělesa. Na zkušebním tělese se vybrousí dvě plochy, které jsou vzájemně přesazeny o 180° a rovnoběžné s osou zkušebního tělesa. Plochy jsou broušeny do hloubky 0,4 mm až 0,5 mm viz obrázek 7.4. Při broušení musí být použito dostatečné množství chladicí kapaliny, aby nedošlo k ovlivnění mikrostruktury zkušebního tělesa. [13]

Norma dovoluje použít měření tvrdosti podle Rockwella HRC, případně měření tvrdosti podle Vickerse HV 30. Vzdálenosti vtisků od čelní plochy jsou zobrazeny na obrázku 7.4. Vzdálenosti vtisků musí být udrženy v toleranci

$\pm 0,1$ mm. Při měření tvrdosti je potřeba zabezpečit, aby případné valy kolem vtisků neovlivnily měření na druhé ploše. [13]



Obr. 7.4 Vzdálenosti vtisků od čela zkušební tyče [13]

U ocelí s nízkou prokalitelností je první měřený bod ve vzdálenosti 1 mm od zakalené čelní plochy. Následující body jsou umístěny od sebe ve vzdálenosti 1 mm až do vzdálenosti 11 mm od zakalené čelní plochy. Poslední body jsou ve vzdálenosti 13 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm a 30 mm od zakalené čelní plochy. [13]

Zápis výsledků zkoušky:

Tab. 7.1 Posloupnost parametrů v označení výsledků čelní zk. prokalitelnosti

J xx–d, případně Jd = xx
xx – naměřená tvrdost HRC nebo HV 30
d – vzdálenost od zakalené čelní plochy [mm]

Příklady zápisu výsledků zkoušky:

- **J 30–20** – ve vzdálenosti 20 mm od zakalené čelní plochy je tvrdost 30 HRC
- **JHV 450–10** – ve vzdálenosti 10 mm od zakalené čelní plochy je tvrdost 450 HV 30.
- **J 5 = 39** – ve vzdálenosti 5 mm od zakalené čelní plochy je tvrdost 39 HRC

7.2 Čelní zkouška prokalitelnosti – ocel 14 109 (100Cr6, 1.3505)

Nejprve byla prováděna čelní zkouška prokalitelnosti na dvou vzorcích z chromové oceli 100Cr6. Zkouška byla provedena v souladu s normou. Všechny úkony, časové prodlevy při ohřevu, výdrži a kalení, jsou uvedeny v podkapitole 7.1.

Chemické složení, mechanické vlastnosti, fyzikální vlastnosti a ostatní údaje včetně grafu pásu prokalitelnosti jsou uvedeny v příloze 3.

Jakmile byla první zkušební tyč ohřáta na teplotu kalení, byla z pece ihned přemístěna do kalicího přípravku. Hned po započetí kalení byla do pece vložena druhá zkušební tyč.

Po zakalení a úplném ochlazení zkušební tyče na ní byly vybroušeny dvě plochy jak bylo uvedeno v podkapitole 7.1. Před vlastním měřením byly na zkušební tyči zhotoveny rysky. Vzdálenosti rysek od zakaleného čela jsou zobrazeny na obrázku 7.4. Měření bylo provedeno metodou podle Rockwella na stupnici C. Na obrázcích 7.5 a 7.6 je zobrazeny zkušební tyče na kterých byla prováděna čelní zkouška prokalitelnosti.



Obr. 7.5 Zkušební tyč 1, ocel 14 109 (100Cr6, 1.3505)



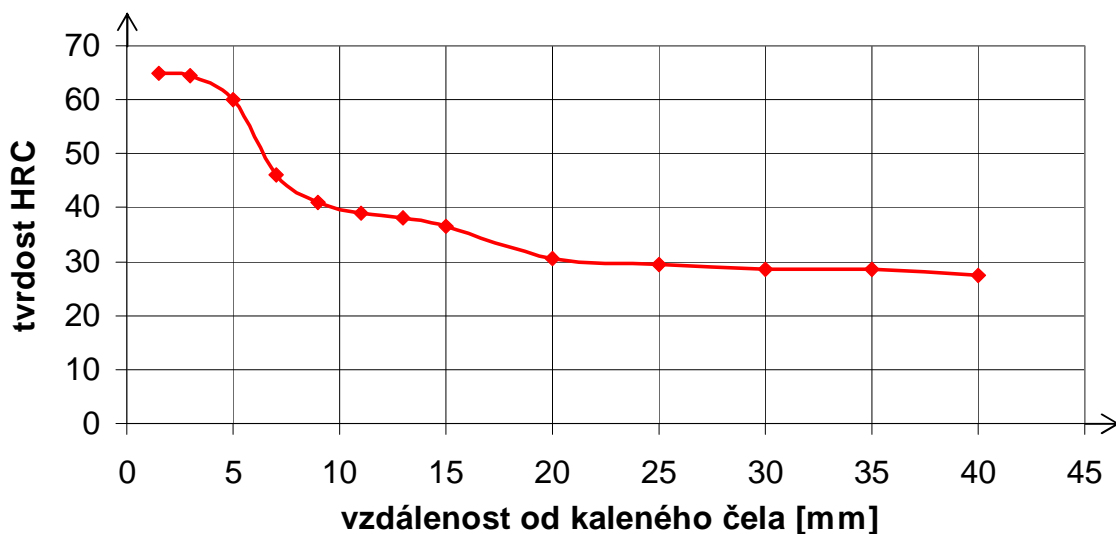
Obr. 7.6 Zkušební tyč 2, ocel 14 109 (100Cr6, 1.3505)

Hodnoty odečtené z tvrdoměru jsou uvedeny v tabulce 7.2. Jak bylo zmíněno dříve, na každém vzorku byly vybroušeny dvě měřené plochy. V tabulce 7.2 jsou tyto plochy uvedené římskými číslicemi.

Tab. 7.2 Naměřené hodnoty tvrdosti

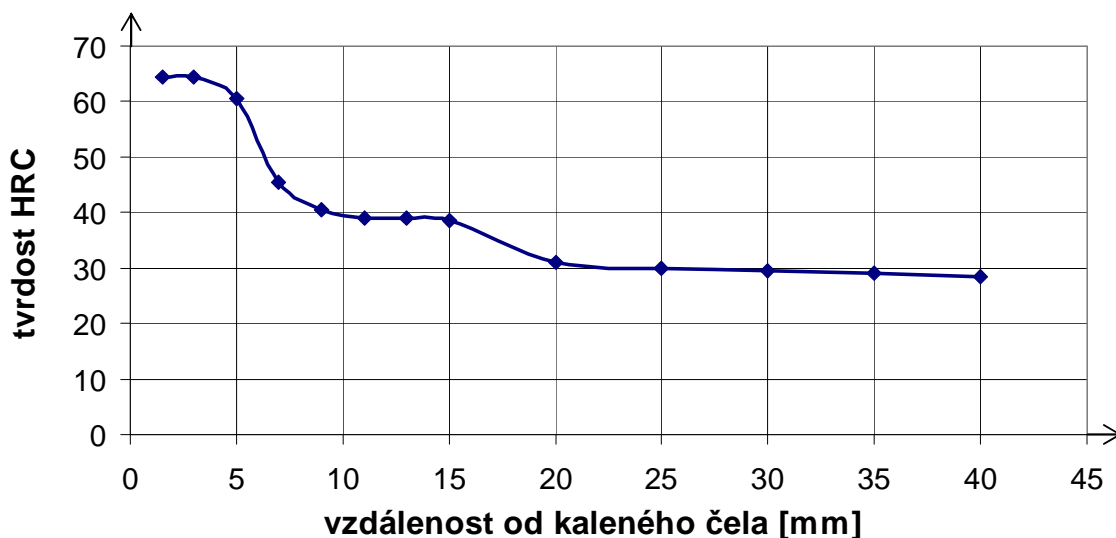
ocel 14 109 (100Cr6, 1.3505)				
vzdálenost vtisku od kaleného čela [mm]	hodnoty tvrdosti HRC			
	zkušební tyč 1		zkušební tyč 2	
	plocha I	plocha II	plocha I	plocha II
1,5	65	65	65	64
3	65	64	65	64
5	60	60	61	60
7	46	46	45	46
9	41	41	41	40
11	39	39	39	39
13	38	38	39	39
15	37	36	38	39
20	30	31	31	31
25	29	30	30	30
30	28	29	29	30
35	28	29	29	29
40	27	28	28	29

Z každého vzorku byla stanovena křivka prokalitelnosti. Jelikož se liší tvrdost změřená na straně I a na straně II byl pro každou vzdálenost vtisku od kaleného čela, byl z těchto dvou hodnot vypočítán aritmetický průměr. Tímto způsobem určené výsledné hodnoty tvrdosti byly vyneseny na svislou osu. Na vodorovnou osu byly pak vyneseny vzdálenosti vtisků od kaleného čela.



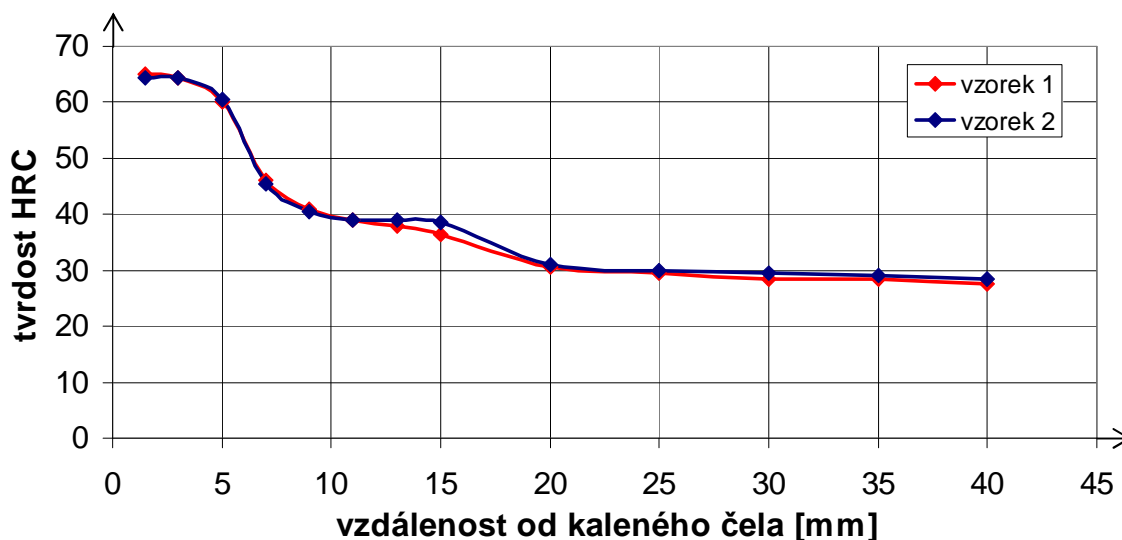
Obr. 7.7 Ocel 14 109 (100Cr6, 1.3505), vzorek 1

Na obrázku 7.7 zobrazena křivka prokalitelnosti pro zkušební tyč 1 a na obrázku 7.8 je křivka prokalitelnosti náležící zkušební tyči 2.



Obr. 7.8 Ocel 14 109 (100Cr6, 1.3505), vzorek 2

Na obrázku 7.9 jsou zakresleny obě získané křivky prokalitelnosti. Prokalitelnost obou vzorků se téměř neliší. Největší rozdíl křivek prokalitelnosti je přibližně ve vzdálenosti 15 mm od kaleného čela. Rozdíl tvrdosti vzorku 1 a 2 činí v tomto bodě 2 HRC.



Obr. 7.9 Ocel 14 109 (100Cr6, 1.3505), porovnání vzorků

7.3 Čelní zkouška prokalitelnosti – ocel 12 040 (C35E, 1.1181)

Při čelní zkoušce prokalitelnosti oceli 12 040 bylo postupováno ve shodě s pokyny, které udává norma zkoušky a s parametry udané v materiálovém listu oceli 12 040. Chemické složení, mechanické vlastnosti, fyzikální vlastnosti a jiné podrobnosti o oceli 12 040 jsou uvedeny v příloze 4. Součástí přílohy 4 je též grafické zobrazení pásu prokalitelnosti oceli 12 040.



Obr. 7.10 Zkušební tyč 1, ocel 12 040 (C35E, 1.1181)

Na obrázcích 7.10 a 7.11 jsou ukázány zkušební tyče. Obrázek 7.11 umožňuje bližší pohled na měřenou plochu, narýsované rysky a na provedené vtisky.



Obr. 7.11 Zkušební tyč 2, ocel 12 040 (C35E, 1.1181)

Zkouška byla opět provedena na dvou vzorcích. Po ohřevu a výdrži na kalící teplotě, byla zkušební tyč neprodleně přemístěna z pece do kalícího přípravku. Po dodržení stanovené doby kalení byla zkušební tyč ponořena pro úplné ochlazení do studené vody.

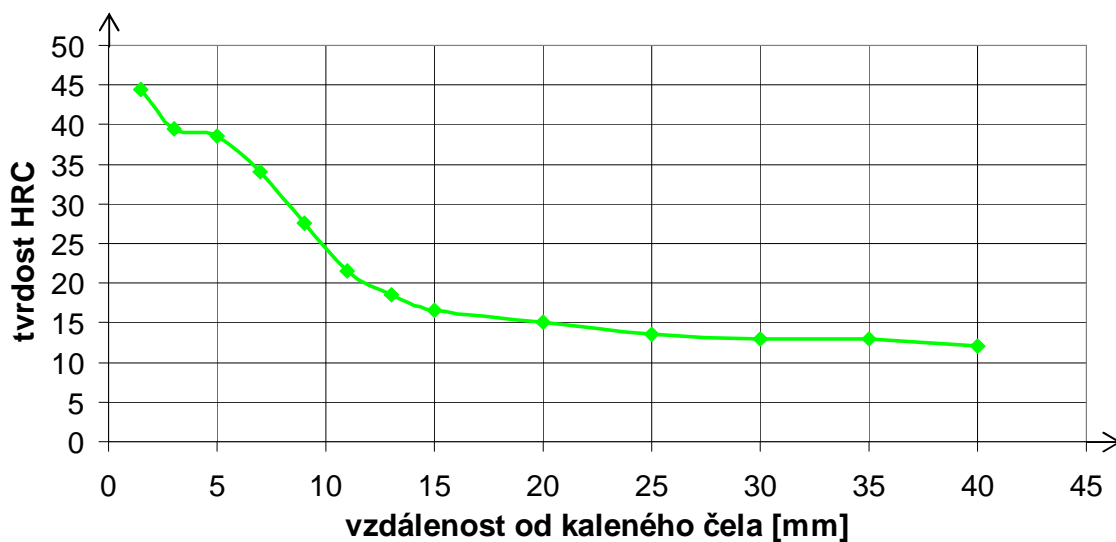
Po úplném ochlazení byly na zkušební tyči vybroušeny plochy určené k měření tvrdosti. Na zkušební tyči byly narýsovány rysky ve vzdálenostech určených normou zkoušky. Poté bylo v uvedených vzdálenostech od kalného čela provedeno měření tvrdosti podle Rockwella na stupnici C.

Po vyjmutí první zkušební tyče z pece byla do této ihned vložena druhá zkušební tyč. Postup zkoušky druhé zkušební tyče byl totožný s postupem zkoušky prvního vzorku. Naměřené hodnoty tvrdostí v bodech jenž jsou stanoveny v normě zkoušky jsou uvedeny v tabulce 7.4.

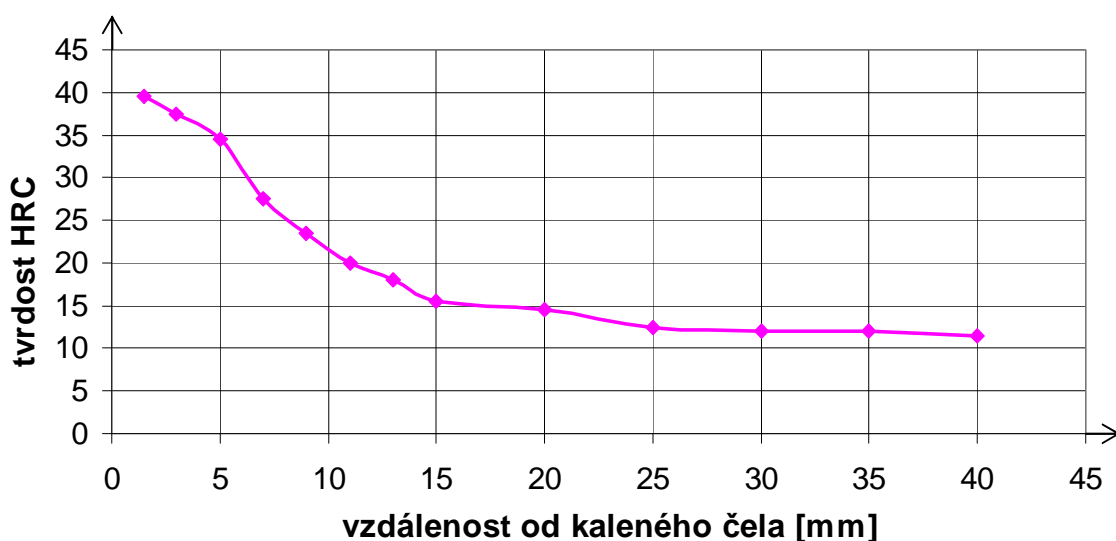
Tab. 7.4 Naměřené hodnoty tvrdosti

ocel 12 040 (C35E, 1.1181)				
vzdálenost vtisku od kaleného čela [mm]	hodnoty tvrdosti HRC			
	zkušební tyč 1		zkušební tyč 2	
	plocha I	plocha II	plocha I	plocha II
1,5	44	45	40	39
3	40	39	38	37
5	38	39	35	34
7	34	34	28	27
9	27	28	23	24
11	21	22	21	19
13	18	19	18	18
15	16	17	16	15
20	15	15	15	14
25	13	14	12	13
30	13	13	12	12
35	13	13	12	12
40	12	12	11	12

Průběh tvrdosti dle Rockwella HRC prvního vzorku v závislosti na vzdálenosti od kalené plochy je zobrazen na obrázku 7.12. Křivka na obrázku 7.13 je křivka prokalitelnosti druhého vzorku.



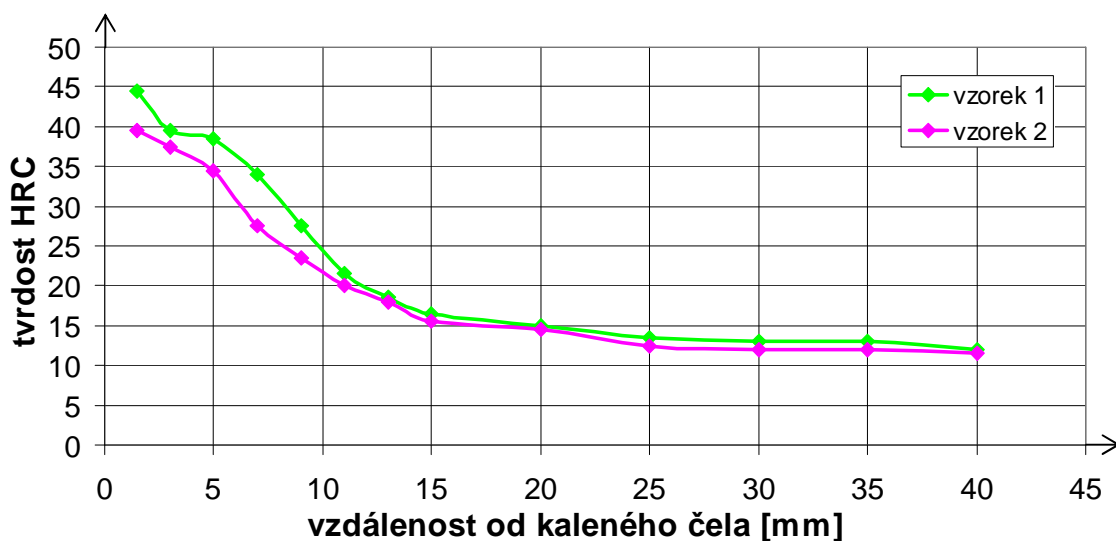
Obr. 7.12 Ocel 12 040 (C35E, 1.1181), vzorek 1



Obr. 7.13 Ocel 12 040 (C35E, 1.1181), vzorek 2

Na obrázku 7.14 jsou zakresleny křivky prokalitelnosti obou měřených vzorků. První zkušební tyč dosáhla po zakalení tvrdost 44 HRC (myšleno v prvním měřeném bodě). Křivka prokalitelnosti prvního vzorku vykazuje velmi rychlý pokles tvrdosti mezi prvními dvěma měřenými body. Mezi druhým a třetím měřeným bodem dochází jen mírnému poklesu tvrdosti. Tento jev nebyl pozorován u druhé zkušební tyče ani u oceli 14 109 a proto nebyl očekáván. Odchytku od očekávaného průběhu tvrdosti lze přisoudit chybě, která mohla nastat při vlastním měření.

Druhá zkušební tyč již vykazuje očekávaný průběh tvrdosti. Na rozdíl od první zkušební tyče druhý zkoušený vzorek nedosáhl tak vysoké zakalitelnosti. V prvním měřeném bodě je rozdíl tvrdosti přibližně 5 HRC. Největší rozdíl tvrdosti mezi vzorky činí přibližně 6 HRC (7 mm od kaleného čela). Pozvolný pokles tvrdosti je pozorován do 15 mm a od vzdálenosti 25 mm od kaleného čela již k poklesu téměř nedochází.

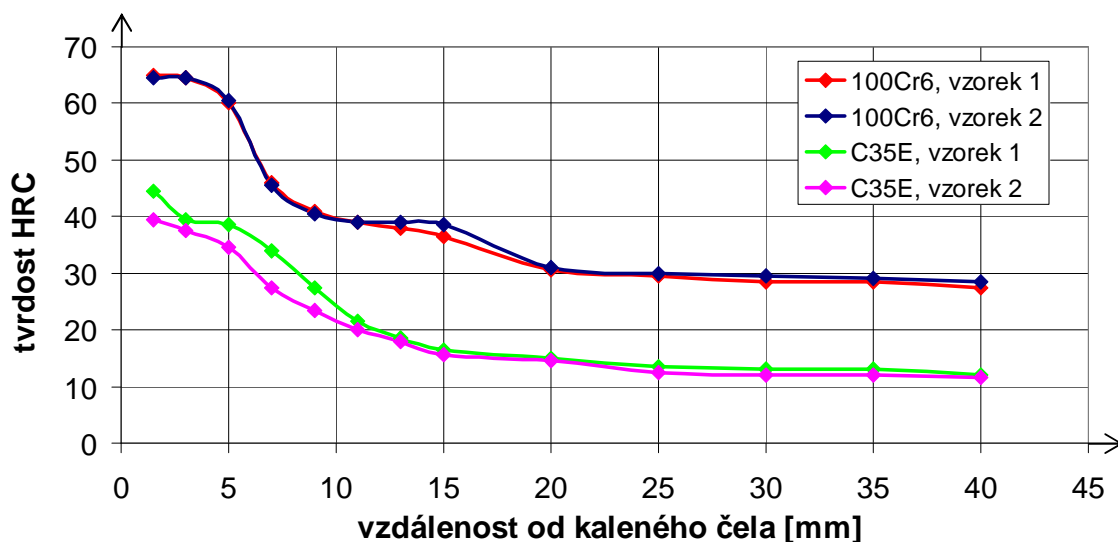


Obr. 7.14 Ocel 12 040 (C35E, 1.1181), porovnání vzorků

7.4 Porovnání a vyhodnocení výsledků provedených zkoušek

Jelikož byla čelní zkouška prokalitelnosti provedena pouze na dvou druzích oceli po dvou zkušebních tělesech nelze z výsledků těchto zkoušek učinit obecný závěr. Na obrázku 7.15 jsou vykresleny všechny získané křivky prokalitelnosti.

Z obrázku 7.15 je patrné, že chromová ocel 14 109 vykazuje vyšší zakalitelnost. U oceli 14 109 byla maximální získaná tvrdost kalením 65 HRC (myšleno v prvním měřeném bodě). Přibližně ve vzdálenosti 5 mm od kalené čelní plochy dochází k prudkému poklesu tvrdosti zkušebních tyčí. Tento jev nebyl pozorován u oceli 12 040. Asi ve vzdálenosti 9 mm až 15 mm dochází pouze k mírnému poklesu tvrdosti. Od vzdálenosti 15 mm od kaleného čela klesá tvrdost opět prudce. Od vzdálenosti 20 mm až do posledního měřeného bodu se tvrdost zásadně nesnižuje. Tvrdost na úseku 20 mm až 40 mm od kaleného čela se pohybuje v rozmezí 3 HRC.



Obr. 7.15 Porovnání prokalitelností oceli 14 109 (100Cr6, 1.3505) a prokalitelnosti oceli ocel 12 040 (C35E, 1.1181)

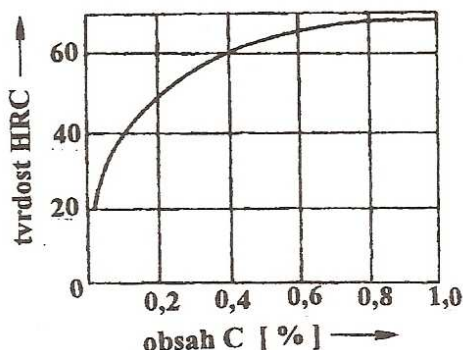
U oceli 12 040 byla po kalení zjištěna maximální tvrdost v rozmezí 39 HRC až 44 HRC (v prvním měřeném bodě). Oproti chromové oceli 14 109 vykazuje uhlíková ocel 12 040 pozvolnější pokles tvrdosti. Do vzdálenosti 13 mm od kaleného čela vykazuje první zkušební tyč z uhlíkové oceli vyšší tvrdost než druhá. Od vzdálenosti 13 mm je pokles tvrdosti velmi pozvolný a nijak zásadní.

Vyšší vhodnost pro kalení má ocel 14 109. Příčinou vyšší tvrdosti získané kalením je zejména uhlík a karbidotvorný chrom. V tabulce 7.5 jsou vypsány procentuální obsahy těchto prvků.

Tab. 7.5 Obsah uhlíku a chromu ve zkoušených vzorcích

ocel	uhlík [%]	chrom [%]
12 040	0,32 – 0,40	max. 0,25
14 109	0,90 – 1,10	1,30 – 1,65

Na obrázku 7.16. je zobrazena závislost tvrdosti podle Rockwella HRC stoupajícím obsahu uhlíku v oceli.



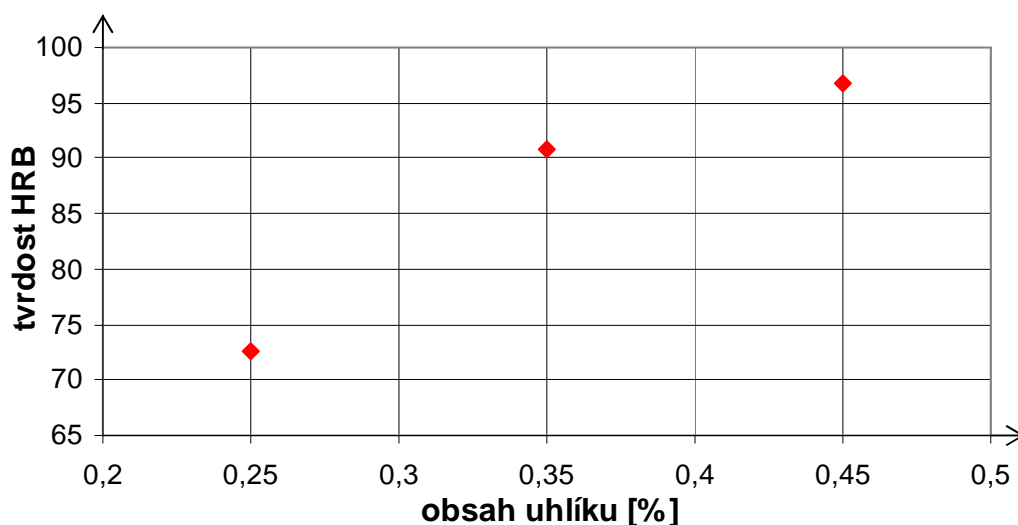
Obr. 7.16 Závislost tvrdosti zakalené nelegované oceli na obsahu uhlíku [17]

Na třech vzorcích z nelegované nekalené oceli byla měřena tvrdost podle Rockwella na stupnici B. Cílem bylo zjistit, jakým způsobem se mění tvrdost nezakalené oceli se vzrůstajícím obsahem uhlíku. Výsledky měření jsou zapísány v tabulce 7.6.

Tab. 7.6 Obsah uhlíku a chromu ve zkoušených vzorcích

Obsah uhlíku [%]	HRB
0,25	72,6
0,35	90,8
0,45	96,7

Jelikož není možno ze tří měření sestavit závislost tvrdosti na obsahu uhlíku, byly výsledky měření zakresleny pouze do bodového grafu viz obrázek 7.17. Pokud při měření nedošlo k chybě lze tvrdit, že při stoupající koncentraci uhlíku v oceli roste tvrdost jak v kaleném, tak v nekaleném stavu.



Obr. 7.17 Tvrdost nezakalené nelegované oceli v závislosti na obsahu uhlíku

ZÁVĚR

V první části byly rozebírány dnes nejvíce používané zkoušky tvrdosti a statistické metody využívané k jejich vyhodnocení. Rozvoj strojírenství jde směrem k zpřesňování a miniaturizaci. Ve zkoušení tvrdosti se tento trend projevuje snižováním zátěžných sil. Oblast zabývající se těmito metodami je nazývána nanotvrdost. Pro zkoušení materiálů v oblasti nanotvrdosti je zapotřebí velmi nákladných speciálních přístrojů.

Další směr, kterým se měření tvrdosti ubírá jsou multifunkční měřicí zařízení propojená s počítačem. Taková zařízení mohou tvrdost nejpoužívanějšími metodami a na základě výsledku měření předpovědět ostatní mechanické vlastnosti, případně i chování materiálu za různých podmínek.

V části druhé byly prováděny čelní zkoušky prokalitelnosti. Výsledky zkoušek ukázaly, že pro kalení je vhodnější ocel 14 109, která dosáhla tvrdost 65 HRC. Naměřená tvrdost byla poněkud nižší než bylo udáno v materiálovém listu. První zkušební tyč z oceli 12 040 dosáhla po zakalení tvrdosti 44 HRC. Druhá zkušební tyč po zakalení dosáhla pouze 40 HRC.

Největší vliv na tvrdost oceli v kaleném stavu má obsah uhlíku a obsah karbidotvorných prvků (Cr, Mo, V, W). V případě potřeby zakalení oceli 12 040 na vyšší tvrdost, lze povrch oceli nasytit uhlíkem a zvýšit tak zakalitelnost.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PTÁČEK, L. *et al. Nauka o materiálu*. 2. opravené a rozšířené vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 516 s. ISBN 80-7204-283-1.
2. MOLLIKOVÁ, Eva. *ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ A VÝROBKŮ* [online]. 2005 [cit. 2010-02-10]. Dostupný z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/Index.html>>.
3. DOLEŽAL, Pavel, PACAL, Bohumil. *Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů* [online]. 2005 [cit. 2010-02-12]. Dostupný z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/hmsm/index.htm>>.
4. SKÁLOVÁ, J., KOVAŘÍK, R. a BENEDIKT, V. *Základní zkoušky kovových materiálů*. Plzeň: [s.n.], 2005. 178 s. ISBN 80-7043-417-1.
5. *Zkousky_tvrlosti* [online]. 2005 [cit. 2010-02-10]. Dostupný z WWW: <www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf>.
6. *Jominiho zkouska prokalitelnosti* [online]. 2009 [cit. 2010-02-24]. Jominiho zkouska prokalitelnosti. Dostupné z WWW: <<http://www.ateam.zcu.cz/download/Jominiho%20zkouska%20prokalitelnosti.pdf>>.
7. *Scratch tester - An easy method of testing coating adhesion*. [online]. 2005 [cit. 2010-02-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.pvd-coatings.co.uk/scratch-adhesion-tester.htm>>.
8. *Knoop microhardness tester*. [online]. 2004 [cit. 2010-02-28]. THE KNOOP MICROHARDNESS TESTER AS A MINERALOGICAL TOOL. Dostupné z WWW: <http://www.minsocam.org/MSA/collectors_corner/arc/knoop.htm>.
9. LUDVÍK, Jan; BÍLEK, Karel; LUDVÍK, Štěpán. *zkousky_tvrlosti* [online]. 2002 [cit. 2010-03-04]. Zkousky_tvrlosti. Dostupné z WWW: <http://www.metrotest.cz/zkousky_tvrlosti.pdf>.
10. Metody a způsoby měření tvrdosti nekovových materiálů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 12. června 2002, č.6, [cit. 2010-03-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/metody-a-zpusoby-mereni-tvrlosti-nekovovych-materialu>>.
11. KARPÍŠEK, Z. *Matematika IV: Statistika a pravděpodobnost*. 3. doplněné vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 170 s. ISBN 978-80-214-3380-9.

12. ČECH, J., PERNIKÁŘ, J. a PODANÝ, K. *Strojírenská metrologie*. 4. přepracované vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 176 s. ISBN 80-214-3070-2.
13. ČSN EN ISO 642. *Ocel - Čelní zkouška prokalitelnosti (zkouška podle Jominyho)*. [s.l.]: [s.n.], 2001-07-01. 24 s.
14. *Normal distribution - Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. 2010 [cit. 2010-04-09]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Normal_distribution>.
15. *68-95-99.7 rule - Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. 2010 [cit. 2010-04-09]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/68-95-99.7_rule>.
16. NOVÁK, Jiří. *Základy teorie chyb a zpracování fyzikálních měření*. [online]. 2001 [cit. 2010-04-09]. Dostupný z WWW: <<http://webfyzika.fsv.cvut.cz/PDF/teoriechyb.pdf>>.
17. KOČMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270s. ISBN 80-214-3068-0.
18. *Chromová ocel pro valivá ložiska* [online]. 2005 [cit. 2010-03-16]. Dostupný z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/HSR/04%20-%20Oceli%20k%20zuslechtovani%20-%20Priloha02.pdf>>.
19. *Oceli k zušlechťování* [online]. 2005 [cit. 2010-03-16]. Dostupný z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Vyuka/HSR/04%20-%20Oceli%20k%20zuslechtovani%20-%20Priloha01.pdf>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
D	[mm]	geometrický průměr kuličky
F	[N]	zatěžující síla
H	[mm]	pádová výška
K	[-]	konstanta zahrnující druh zkoušeného materiálu
L	[mm]	délka větší úhlopříčky
R_m	[Mpa]	mez pevnosti materiálu
S_x	[dle zpracovávané veličiny]	výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru
Z	[mm]	velikost deformace vtisku
d	[mm]	aritmetický průměr dvou na sebe kolmých geometrických průměrů vtisku
e	[-]	Eulerovo číslo
h	[mm]	výška odskoku
h_b	[mm]	hloubka vtisku
k	[-]	konstanta zahrnující vliv druhu materiálu
k_1	[-]	konstanta zahrnující vliv tvrdoměru
k_2	[-]	konstanta zahrnující druh zkoušeného materiálu
n	[-]	rozsah statistického souboru
u	[mm]	aritmetický průměr dvou úhlopříček vtisku
x_i	[dle zpracovávané veličiny]	i-tá hodnota měřené veličiny
x_m	[dle zpracovávané veličiny]	naměřená hodnota
x_p	[dle zpracovávané veličiny]	konvenčně pravá hodnota
\bar{x}	[dle zpracovávané veličiny]	výběrový aritmetický průměr
Δ	[dle zpracovávané veličiny]	absolutní chyba měření
Δ_s	[dle zpracovávané veličiny]	systematická chyba
δ	[dle zpracovávané veličiny]	náhodná chyba
μ	[dle zpracovávané veličiny]	aritmetický průměr
π	[-]	číslo pí
σ	[dle zpracovávané veličiny]	směrodatná odchylka aritmetického průměru
\varnothing	[mm]	geometrický průměr

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Univerzální tvrdoměr firmy ERNST HÄRTEPRÜFER SA
Příloha 2 Tvrdoměr firmy ERNST HÄRTEPRÜFER SA, umožňující měřit
tvrdost podle Brinella a Rockwella
Příloha 3 Vlastnosti oceli 14 109 (100Cr6, 1.3505)
Příloha 4 Vlastnosti oceli 12 040 (C35E, 1.1181)

Příloha 1 (1/5)

Univerzální tvrdoměr firmy ERNST HÄRTEPRÜFER SA



The proper solution for any hardness control issue

ernst

Příloha 1 (2/5)

Univerzální tvrdoměr firmy ERNST HÄRTEPRÜFER SA

OMNITEST - universal hardness tester

OMNITEST – THE UNIVERSAL

Omnitest performs hardness testing with loads from 9.804 N to 2451 N (1-250 kp) and permits a fast and easy selection of the test procedure.
All procedures comply with the standards DIN & ISO EN 6506, 6507, 6508, 2039, BS and ASTM.



Omnitest is equipped with an integrated PC with a Windows XP operating system, high resolution (2 mega pixel) USB camera, with LED light source.
Fully automatic testing of all indentations with the option to operate manually.
Test results are displayed on 12" LCD display.

Omnitest can send test results to a printer or to a local network at any time.
The indentation image can be captured and memorized, with the possibility to be recalled even long after the issue of the test protocol net transmission.

5 languages available: English, German, French, Italian and Czech. Further languages on request

It is possible to manufacture different types of anvils and fixing devices, to suit customer needs.

Příloha 1 (3/5)

Univerzální tvrdoměr firmy ERNST HÄRTEPRÜFER SA

OMNITEST - universal hardness tester

OMNITEST - CHARACTERISTICS

- Integrated PC with Pentium 4, 40 Gb hard disk, Windows XP
- 12" LCD screen
- Software for Omnitest Universal Hardness Tester
- Automatic scan reading of Brinell or Vickers indentations
- Automatic software for Rockwell and Superficial Rockwell reading by means of an electronic probe for depth measurement
- Load choice, speed and application time are automatically defined according to the standards.
- Storage of test results
- Automatic testing process with display of the test method.
- Automatic correction for round surfaces, according to DIN – EN – ISO – ASTM.
- Statistics with immediate graphical and numerical display of result.
- Min. and max. hardness values, average, standard deviation, cp and cpk coefficients.
- Histogram.
- Conversion into Rockwell A, B, C, D, E, F, G, H, R, Brinell and Vickers scales, according to ISO 18625.
- Protocol printout in A4 with data and logo of the operator.
- Protocol in ACCESS format for export to another PC or to Excel.
- Possibility to enter alphanumeric data via LCD screen.
- Possibility to connect a remote keyboard and mouse.
- The system is built to accommodate future additions and upgrades.

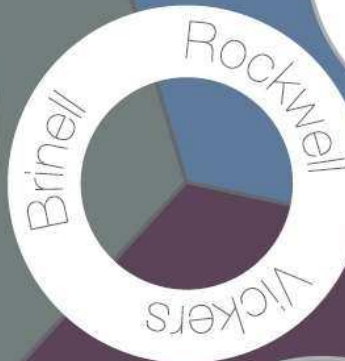
Automatic scan reading of Brinell hardness with 35x and 133x interchangeable objectives.



Possibility of Rockwell and Superficial Rockwell testing with loads from 15 kp to 150 kp (148 N to 1481 N)



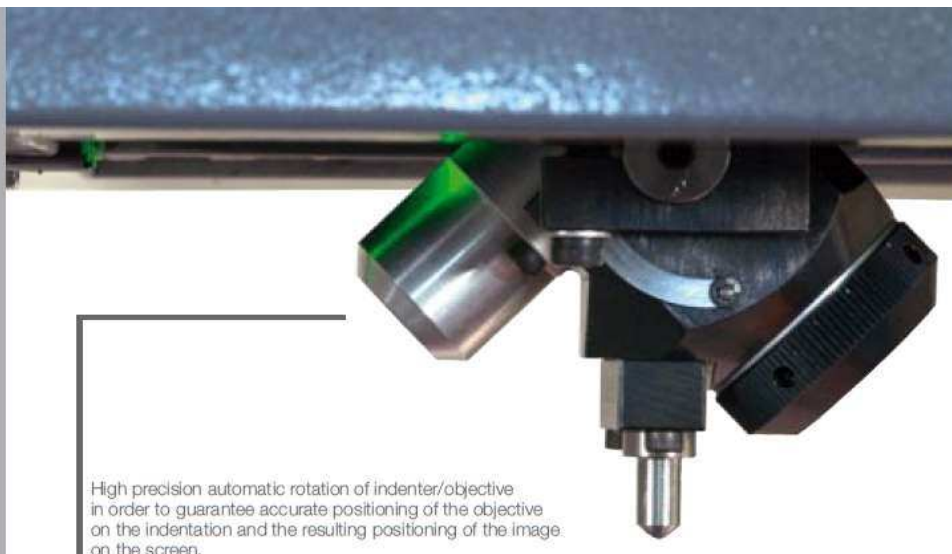
Automatic scan reading of Vickers hardness with 133x and 400x interchangeable objectives.



Příloha 1 (4/5)

Univerzální tvrdoměr firmy ERNST HÄRTEPRÜFER SA

OMNITEST - universal hardness tester



Příloha 1 (5/5)

Univerzální tvrdoměr firmy ERNST HÄRTEPRÜFER SA

OMNITEST - universal hardness tester

OMNITEST - TECHNICAL DATA

Standardized procedure:

Vickers	DIN EN ISO 6507, ASTM E-384
Brinell	DIN EN ISO 6506, ASTM E 10
Rockwell	DIN EN ISO 6508, ASTM E 18

Test loads:

Vickers	1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120 kp
Brinell	1, 2.5, 5, 6.25, 10, 15.625, 25, 30, 31.25, 62.5, 100, 125, 187.5, 250 kp
Rockwell and Superficial Rockwell	Preload: 3-10 kgF Load: 15, 30, 45, 60, 100, 150 kp

Indenters:

Vickers	Pyramidal indenter 136°
Brinell	Ball indenter 1 mm, 2.5 mm, 5 mm, 10 mm
Rockwell	Conical diamond indenter 120° Ball indenter 1/16", 1/8", 1/4", 1/2" (on request)

Optical testing device:

From 35x to 400x with interchangeable objectives (400x on request)
LED lighting source

Dimensions:

Max measurable height	290 mm
Max measurable depth	250 mm
Weight	250 kg

Test load application:

DC motor via closed loop by means of force transducer
Test load selection by LCD screen
Automatic rotation to indenter/objective

Results displaying:

Numeric on LCD (with automatic storage)
Graphic capability for result analysis with variable scale

Connections and power supply:

Interface	RS232 and USB standard
Standard power supply	230 V, 50 Hz (220 VA) Other power supplies on request

CE conformity

STANDARD ACCESSORIES

Rockwell diamond indenter: diamond 120°
Vickers diamond indenter: pyramidal 136°
Brinell ball indenter: ball 2.5 mm
Rockwell ball indenter: 1/16"
35x objective
133x objective
Flat anvil 120 mm Ø
Flat anvil 60 mm Ø
V-anvil for rounds 3 – 12 mm Ø
V-anvil for rounds 12 – 90 mm Ø
Special key for easy indenter removal
Set of wrenches
Wooden accessory box
Vinyl dust cover

ACCESSORIES ON REQUEST

400x objective
Knoop indenter
1 mm Ø indenter
5 mm Ø indenter
10 mm Ø indenter
Rockwell indenter 1/2"
Rockwell indenter 1/4"
Rockwell indenter 1/8"
Set of 3 Yamamoto HRC hardness
test blocks with EN 10004 calibration
V-anvil for rounds up to 200 mm Ø
Flat anvil 200 mm Ø
Thin specimen attachment type 1 (0.4 – 3 mm)
Thin specimen attachment type 2 (0.02 – 0.5 mm)
Thin specimen attachment type 3 (0.02 – 8 mm)
Bench support
Software for Knoop testing
Protocol on Excel
Printer
Printer cable
Remote mouse
Remote keyboard

ERNST HÄRTEPRÜFER SA

www.ernstsa.com

Strada Cantonale CH-6814 Lamone - Switzerland

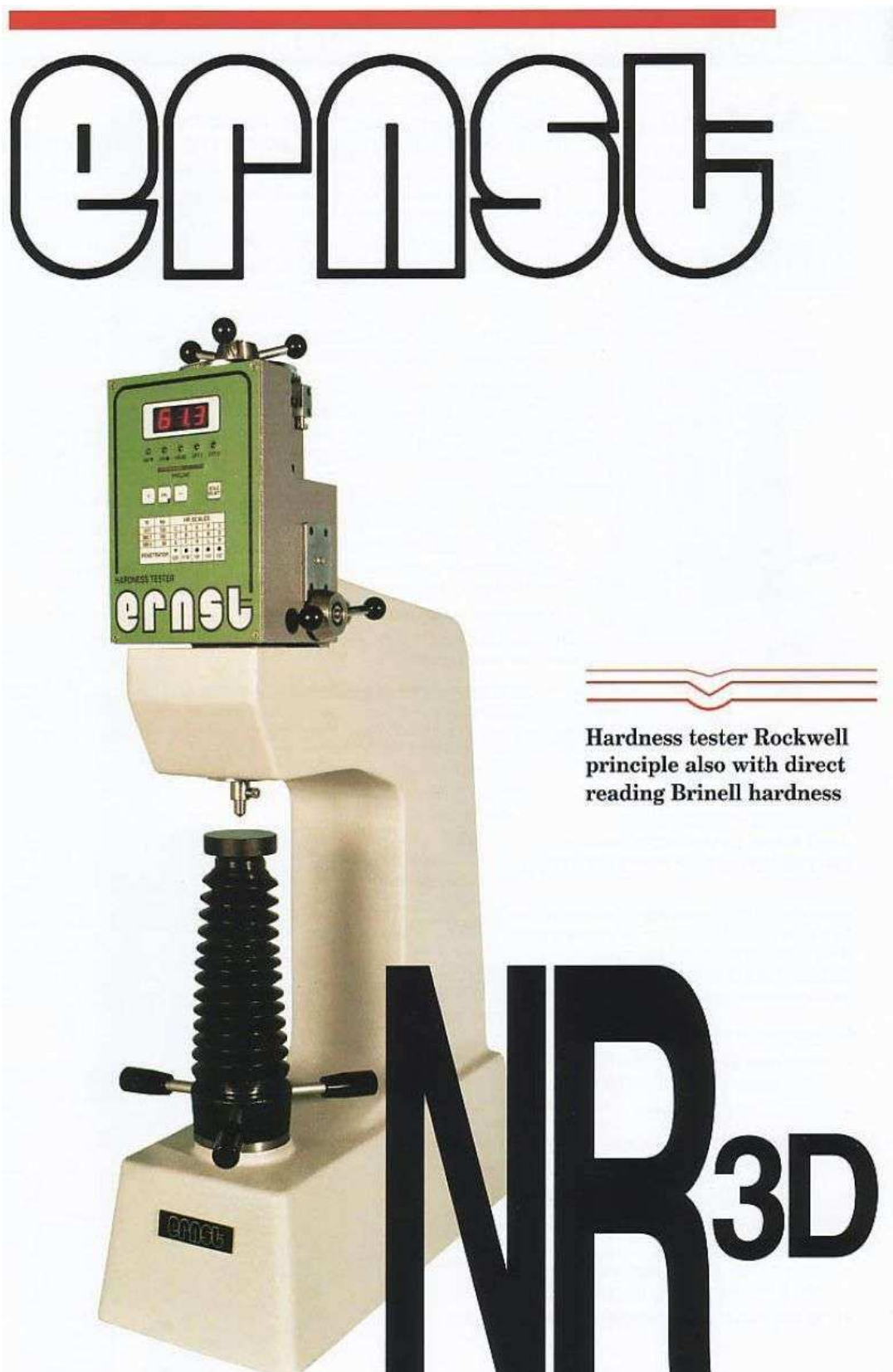
■ Tel. +41 91 966 21 81 ■ Fax. +41 91 966 97 35 ■ info@ernstsa.com

We reserve the right to make modifications

801-123EN01

Příloha 2 (1/3)

Tvrdoměr firmy ERNST HÄRTEPRÜFER SA, umožňující měřit tvrdost podle Brinella a Rockwella



Příloha 2 (2/3)

Tvrdoměr firmy ERNST HÄRTEPRÜFER SA, umožňující měřit tvrdost podle Brinella a Rockwella

NR3D • Hardness tester Rockwell/Brinell



HARDNESS TESTER NR3 D ACCORDING TO ROCKWELL PRINCIPLE WITH DIRECT READING ALSO OF THE BRINELL HARDNESS

The hardness tester NR3 D works according to the Rockwell principle with standard preload and load.

It has also been designed to carry out Brinell testing with direct reading on display, thereby achieving in a few seconds the kind of control which would normally take a considerable amount of time.

The NR3 D hardness tester has a diversified application field. With the different available combinations of standard loads and indenters, it is possible to test very hard materials as well as soft and plastic ones.

This is why the NR3 D is the ideal hardness tester for those industries who need to test many different materials, before and after processing and heat treatment. It is a very robust instrument and requires very little service, since the load application and testing system is contained in the test head.

In case of a requirement to carry out tests with 15 - 30 - 45 kp. In accordance with Rockwell superficial testing, it would be sufficient to buy a Rockwell superficial head, thereby avoiding the necessity to purchase a complete new instrument. The superficial test head could then be used with the existing stand and accessories.

In addition to the NR3 D capacity to check many different types of material, it can also be used to test components of different size and profile.

Included in the accessory kit are different anvils that can be used for testing both, flat and cylindrical surfaces. Additional anvils and special supports are available on request for checking components having large diameters or awkward shapes.

WORKING PRINCIPLES AND MAIN CHARACTERISTICS OF THE NR3 D HARDNESS TESTER

The NR3 D hardness tester works according to the Rockwell principle with load application achieved by a preload spring system, set in such a way that the load is constant and does not require periodical calibration or special adjustment.

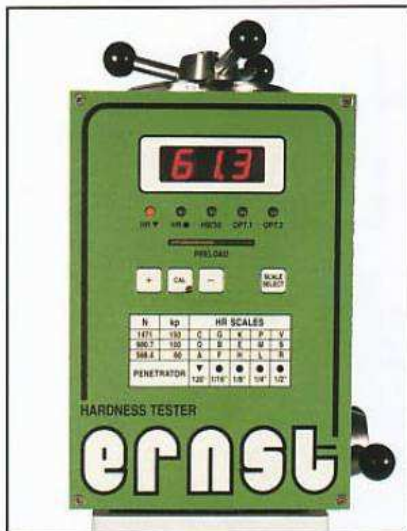
Measurement procedure:

- Select load by rotating the handle which is located on the upper part of the test head.
- Selection of the indenter.
- Scale selection by means of the key on the front board.
- Location of the component on the anvil.
- Bring the component into contact with the indenter by rotating the handle and applying preload. Position of preload is indicated by led.
- Load application and load detach by means of the lever located on the side of test head.
- The hardness value can be read on the display.



Příloha 2 (3/3)

Tvrdoměr firmy ERNST HÄRTEPRÜFER SA, umožňující měřit tvrdost podle Brinella a Rockwella



TECHNICAL DATA:

Test head type DR (Rockwell standard loads)

Preload: 10 kp (98 N)

Rockwell loads: 60 kp (588 N) - 100 kp (980 N) -

150 kp (1471 N)

Brinell loads: 62.5 kp (612 N) - 125 kp (1226 N) -

187.5 kp (1839 N)

Scales to select: HRA - HRB - HRC and all Rockwell scales

Brinell HB 30

Other scales on request: (HB 5 - HB 10 - Kg/mm² - N/mm²)

Test head type DSR (Rockwell superficial loads)

Preload: 3 kp (29.4 N)

Rockwell loads: 15 kp (147 N) - 30 kp (294 N) - 45 kp (441 N)

Brinell loads: 10 kp (98 N) - 15.6 kp (153 N) - 31.2 kp (306 N)

Scales to select: HR15N - HR30N - HR45N - HR15T - HR30T - HR45T and all Rockwell superficial scales

Other scales on request: (HB 2.5 - HB 5 - HB 10)

Possibility of calibration of every single scale

Useful dimensions

Height: 200 mm

Throat: 175 mm

Overall size

Base: 480x190 mm

Height: 770 mm

Weight: 58 Kg

STANDARD ACCESSORIES:

In polished wooden box

- Rockwell conical diamond indenter *
- Rockwell ball indenter 1/16 *
- Brinell ball indenter 2.5 mm
- Rockwell test block *
- Brinell test block
- Flat anvil ø 60 mm *
- Flat anvil ø 10 mm *
- Large V-anvil *
- Small V-anvil *
- Plastic cover *
- Spare balls
- Printer output RS232

* NR3 D Rockwell Superficial

ACCESSORIES ON REQUEST:

- Flat anvil ø 200 mm
- V-anvil for rounds max. ø 150 mm
- Rockwell ball indentors 1/8" - 1/4" - 1/2"
- Brinell ball indentors 1 mm - 5 mm
- C-form extension for measuring internal parts (See accessories catalogue code n° 801-120EN01)
- Output RS 232 for printer



Příloha 3 (1/4)

Vlastnosti oceli 14 109 (100Cr6, 1.3505) [18]

ČSN 41 4109		Chromová ocel		OCEL				
STN 41 4109		pro valivá ložiska		14 109				
Chemické složení [hm. %]								
C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Ni + Cu	P	S
0,90–1,10	0,30–0,50	0,15–0,35	1,30–1,65	max 0,30	max 0,25	max 0,50	max 0,027	max 0,030
Polotovary								
[1] předvalky			[4] bezešvé trubky tvářené za tepla					
[2] tyče válcované za tepla			[5] tyče tažené za studena					
[3] výkovky			[6] dráty tažené za studena					
Mechanické vlastnosti								
Polotovar	[1] [2] [3]		[4]		[5] [6]			
Rozměr t, d [mm]	–		–		–			
Stav	.3		.3		.3			
Mez kluzu R _e [MPa] inf.	441		–		441			
Mez pevnosti R _m [MPa]	608–726		608–726		628–765			
Tažnost A ₅ [%] inf. podél	18		18		18			
Kontrakce Z [%] inf.	35		35		35			
Vrubová houževnatost KCU 2 [J.cm ⁻²]	–		–		–			
Tvrdost HB	max 210		max 220		max 225			
Modul pružnosti E [GPa]	213 (při 23 HRC), 210 (při 54 HRC), 202 (při 63 HRC)							
Modul pružnosti va smyku G [GPa]	–							
Teplota [°C] / tvrdost			20	200	400	600		
Modul pružnosti E [GPa] za zvýšených teplot	23 HRC	213	202	188	166			
	54 HRC	210	197	182	–			
Fyzikální vlastnosti								
Hustota	Měrná tepelná kapacita	Teplotní součinitel roztažnosti		Tepelná vodivost	Rezistivita			
ρ [kg . m ⁻³]	c _p [J . kg ⁻¹ .K ⁻¹]	α [K ⁻¹]		λ _t [W . m ⁻¹ . K ⁻¹]	ρ [Ω . m]			
7 850	480	12,5.10 ⁻⁶		37,26	256.10 ⁻⁹			

Příloha 3 (2/4)

Vlastnosti oceli 14 109 (100Cr6, 1.3505) [18]

Odolnost proti degradačním procesům				
ODOLNOST PROTI KOROZI				
normální				
ODOLNOST PROTI OPOTŘEBENÍ¹)				
HRC	opotřebení [mg . mm ⁻² . m ⁻¹]			
58–59	0,0267			
61–62	0,0240			
ODOLNOST PROTI ÚNAVĚ				
mez únavy v ohybu při symetrickém cyklu [MPa]				
pro: HRC = 58,5–59,0	630			
HRC = 60,5–61,0	715			
HRC = 62,5–63,0	645			
Technologické údaje				
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ				
žíhání na měkko	720–780 °C		4 h na teplotě, ochlazování v peci	
kalení	820–840 °C		ochlazovat v oleji	
	790–820 °C		ochlazovat ve vodě	
popouštění	150–170 °C		ohřev v oleji, 3 h na teplotě	
nejnižší tvrdost po kalení do oleje ~ 62 HRC				
mikrostruktura ve stavu .3: zrnitý perlit, zbytky lamelárního perlitu jsou dovoleny do 10 %				
tvrdost HRC při teplotě popouštění				
dobu popouštění [h]	150 °C	175 °C	200 °C	250 °C
2	63,0	62,0	60,2	58,0
4	62,5	61,0	59,1	57,0
TVAŘITELNOST				
třída tvařitelnosti za tepla 2				
teploty tváření	1 050–800 °C		ochlazovat na vzduchu	
OBROBITELNOST		soustružení, hoblování	frézování, vrtání	broušení
polotovary	[2] [3] stav .3	13b	13b	–
	[4] .3	13b	13b	–
	[5] .3	12b	12b	–
Použití				
Pro výrobu kuliček do Ø 25 mm, válečků a kuželíků do Ø 18 mm a kroužků valivých ložisek do tloušťky stěny 16 mm.				
Ostatní vlastnosti				
Druh oceli podle způsobu výroby		Barevné značení podle ČSN 42 0010	Třída odpadu podle ČSN 42 0030	
elektroocel		modrá - bílá - oranžová	008	

Příloha 3 (3/4)

Vlastnosti oceli 14 109 (100Cr6, 1.3505) [18]

Porovnání se zahraničními materiály					
ISO		EURO		Německo	
Type 1-0	ISO 683/17-73	100Cr6	EN 94-73	100Cr6	DIN 17230-80
Francie		Velká Británie		Rusko	
100Cr6	NF A35-565-94	535 A99 2S135	BS 970/1-83	ŠCh15	GOST 801-81
100Cr6	NF A35-552-86				
100Cr6	NF A35-553-82				
100Cr6	NF A35-590-92				
100Cr6 RR	NF A36-102-93				
USA		Japonsko		Kanada	
52100	ASTM A29	SUJ 2	JIS G4805-90	—	—
E 52100	ASTM A295	SUJ 4	JIS G4805-90		
E 52100	ASTM A322				
E 52100	ASTM A506				
E 52100	ASTM A519				
Itálie		Rakousko		Švédsko	
100Cr6	UNI 3097-75	—	—	2258	SS 142258
Polsko		Maďarsko		Norsko	
LH 15	PN H-84041	GO 3	MSZ 17789-83	—	—
Finsko		Švýcarsko		Španělsko	
—	—	—	—	100Cr6 F.1310	UNE 36027-86 UNE 36027-86
Austrálie		Belgie		Bulharsko	
52100	AS 1444-86	—	—	SchCh15	BDS 12731-75
Brazílie		Čína		Jugoslávie	
—	—	GCr 15	GB 3203-82	Č.4146	JUS C.B0.601-86
Rumunsko		—		—	
RUL 1	STAS 1456/1-89	—		—	
RUL 1v	STAS 11250-89				
Poznámky					
1) hodnoty platí pro odvalování válečků bez mazání při zatížení 981 MPa; opotřebení je dáno úbytkem hmotnosti [mg] a součinitelem stykové plochy [mm ²] a proběhnuté dráhy [m]					

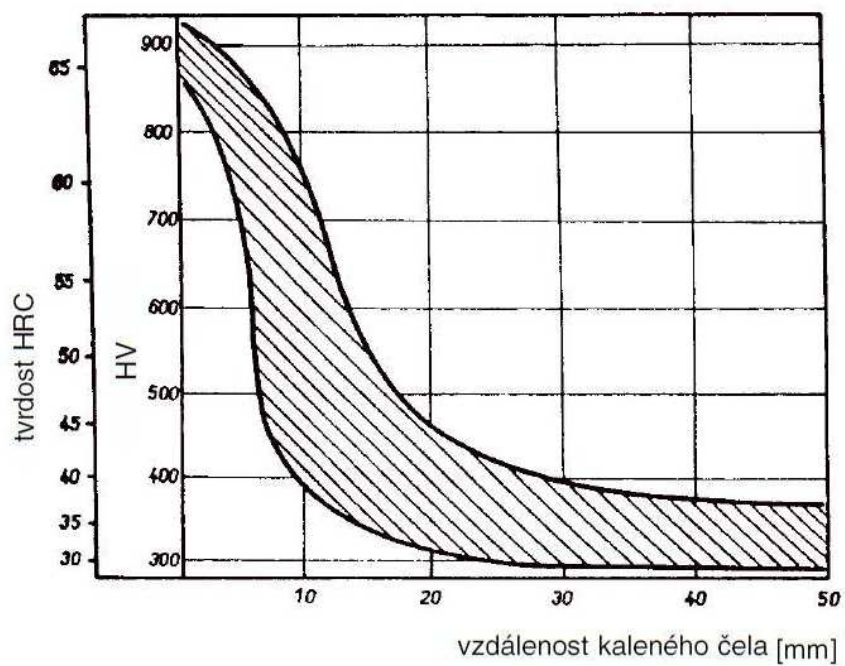
Příloha 3 (4/4)

Vlastnosti oceli 14 109 (100Cr6, 1.3505) [18]

OCEL 14 109

ČSN 41 4109

Pás prokalitelnosti



Příloha 4 (1/4)

Vlastnosti oceli 12 040 (C35E, 1.1181) [19]

ČSN 41 2040

STN 41 2040

Uhlíková ocel k zušlechťování

12 040

OCEL

12 040

Chemické složení [hm. %]

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
0,32–0,40	0,50–0,80	0,15–0,40	max 0,25	max 0,30	max 0,30	max 0,040	max 0,040

Polotovary

[1] předvalky	[6] bezešvé trubky tvářené nebo tažené za tepla
[2] tyče válcované za tepla nebo kované	[7] přesné bezešvé trubky tvářené nebo tažené za studena
[3] tenké plechy válcované za tepla	[8] tyče tažené za studena
[4] tlusté plechy válcované za tepla	[9] tyče tepelně zpracované po tažení za studena
[5] výkovky	[10] dráty tepelně zpracované po tažení za studena

Mechanické vlastnosti

Polotovary	[1] [2] [5]	[2] [5]	[2]	[2] [5]	
Rozměr t, d [mm]	–	25–100	30	≤16	16–40
Stav	. 0	. 1	. 6	. 7	
Mez kluzu R _e nebo R _p 0,2 [MPa]	–	285	325	430	370
Mez pevnosti R _m [MPa]	–	min 480	540–690	630–780	600–750
Tažnost A ₅ [%] min	–	20	22	17	19
Kontrakce Z [%] min	–	–	55	40	45
Vrubová houževnatost KCU 3 [J.cm ⁻²] min	–	–	60	55	55
Tvrdost HB	max 208	135–202	155–208	187–237	171–228
Modul pružnosti E [GPa]	206				
Modul pružnosti ve smyku G [GPa]	79				

Polotovary	[3]		[4]				[5]	
Rozměr t, d [mm]	0,8–2,8		4–60	3–120	61–80	81–100	25–100	100–300
Stav	. 1	. 3	. 1	. 3	. 5		. 6	
Mez kluzu R _p 0,2 [MPa]	295	–	315	–	295	285	325	295
Mez pevnosti R _m [MPa]	490–640	440–570	min 530	–	min 510		540–690	510–650
Tažnost A ₅ , A ₁₀ [%]	A ₁₀ =19	A ₁₀ =19	napříč A ₅ =20	–	napříč A ₅ =18		A ₅ =22	A ₅ =20
Kontrakce Z [%] min	–		–	–	–	–	55	50
Vrubová houževnatost KCU 3 [J cm ⁻²] min	–		–	–	–	–	70	65
Tvrdost HB	–			max 183	–	–	155–208	146–195

Mez kluzu R _p 0,2 [MPa] za zvýšených teplot	20°C	100°C	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C
	420	395	350	325	290	250	210
	325	305	275	250	225	190	160

Příloha 4 (2/4)

Vlastnosti oceli 12 040 (C35E, 1.1181) [19]

Fyzikální vlastnosti									
Hustota ρ [kg . m ⁻³]	Měrná tepelná kapacita c_p [J . kg ⁻¹ .K ⁻¹]			Teplotní součinitel roztažnosti α [K ⁻¹]		Tepelná vodivost λ_t [W . m ⁻¹ . K ⁻¹]		Rezistivita ρ [Ω . m ⁻¹]	
7 850	—			11,9 . 10 ⁻⁶		49		120 . 10 ⁻⁹	
Odolnost proti únavě									
Mez únavy σ_c [MPa] při napětí:									
R_m [MPa]	střídavém			míjivém			v ohybu za rotace (zkuš. tyč)		
	v ohybu	tah — tlak	v krutu	v ohybu	v tahu	v krutu	hladká	vrub 2mm	vrtání 2mm
640	320	250	185	480	410	260	330	165	190
590	285	230	165	435	365	225	290	135	150
540	265	210	150	400	330	205	265	115	110
Technologické údaje									
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ									
normalizační žíhání			840–870 °C		ochlazovat na vzduchu				
žíhání na měkko			680–720 °C		ochlazovat v peci				
kalení			840–870 °C		ochlazovat ve vodě (tlustší kusy)				
			850–880 °C		ochlazovat v oleji (tenčí kusy)				
popouštění			540–680 °C		ochlazovat na vzduchu				
teploty přeměn			A_{C1} ~720–735 °C		A_{C3} ~775–795 °C		M_S ~335 °C		
povrchová tvrdost při povrchovém kalení			$\varnothing \leq 40$ mm		53 ± 3 HRC				
			41–100mm		50 ± 3 HRC				
optimální průměr pro zušlechťení			17mm (voda)		7mm (olej)				
Nejnižší doporučená teplota použití ($R_m = 740$ MPa) při namáhání:									
statickém			-70 °C						
dynamickém			-50 °C (pro KCU 2 min 34 J . cm ⁻²)						
TVAŘITELNOST									
třída tvařitelnosti za tepla 1			teploty tváření 1 150–750 °C			pomalu ochlazovat			
SVAŘITELNOST									
podle ČSN 05 1310 — obtížná									
OBROBITELNOST soustružení, frézování, vrtání									
stav.1	HB ~ 197		13b						
stav.6	HB ≤ 208		13b						
stav.7	HB ≤ 223		13b						
stav.8	HB ≤ 239		12b						
TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY									
zkouška lámavosti podle ČSN 42 0401									
polotovár [3] napříč	stav . 1	úhel ohybu	$\alpha = 180^\circ$	průměr trnu		D = 2a			
	stav . 3		$\alpha = 180^\circ$			D = 1,5a			

Příloha 4 (3/4)

Vlastnosti oceli 12 040 (C35E, 1.1181) [19]

Použití					
Vhodná na velké hřídele stabilních spalovacích motorů, parních strojů a čerpadel, hřídele těžních strojů, transmisní hřídele, excentry, sloupy a válce lisů, tvarová tělesa, čepy, kolíky, tlačítka, rozpěrná pouzdra, destičky, šoupátka, čelisti, šrouby, pístnice, ojnice, kované svorníky tlakových nádob, závěsy pružin, ruční a nožní páky, součásti řízení, táhla, jeřábové háky apod.					
Ostatní vlastnosti					
Druh oceli podle způsobu výroby		Barevné značení podle ČSN 42 0010		Třída odpadu podle ČSN 42 0030	
uklidněná		zelená – žlutá – hnědá		002	
Porovnání se zahraničními materiály					
ISO		EURO		Německo	
C35E4	ISO 683/1-87	C35 C35E C36	EN 10083-2-91 EN 10083-1-91 EN 86-70	C35 CK35 C35	DIN 17200-87 DIN 17200-87 DIN EN 10083-2-91
Francie		Velká Británie		Rusko	
C35 XC38 XC38H1 C35	NF A 37-502-84 NF A 35-554-82 NF A 35-552-84 NF EN 10083-2-91	40HS C35 080A35 080M36	BS 1449/1-91 BS EN 10083-2-91 BS 1449/1-91 BS 970/1-83	35	GOST 1050-88
USA		Japonsko		Kanada	
Gr. 1035	ASTM A576-81	S35C S35CM S38C	JIS G4051-79 JIS G3311-88 JIS G4051-79	–	–
Itálie		Rakousko		Švédsko	
C35 C35 C36 C35 C35E	UNI 7065-72 UNI 7845-78 UNI 8551-84 UNI EN 10083-2-91 UNI EN 10083-1-91	C35 C35S C35SW	ÖNORM M3161 ÖNORM M3120-86 ÖNORM M3108-67	1550 1572-02	SS 141550-90 SS 141572
Polsko		Maďarsko		Norsko	
35	PN H84019-93	C35 C35E MC	MSZ 61 MSZ 61 MSZ 1745-79	–	–
Finsko		Švýcarsko		Španělsko	
455	SFS 455	C35 Ck35	10645 10645	C35 C35K 1C35 C35	UNE 36051-91 UNE 36011-75 UNE 36051 UNE EN 10083-2-91
Austrálie		Čína		Rumunsko	
1035 K1035	AS 1442-92 AS 1442-83	35 35 35 35	GB 699-88 GB 3275-91 GB 3522-83 GB 8162-87	OLC35q OLC35x OLC35xs	STAS 8949-82 STAS 880-88 STAS 880-88
Bulharsko		Belgie		–	
35	BDS 5785-83	C36 C35-1	NBN 253-06-72 NBN 253-02-72	–	

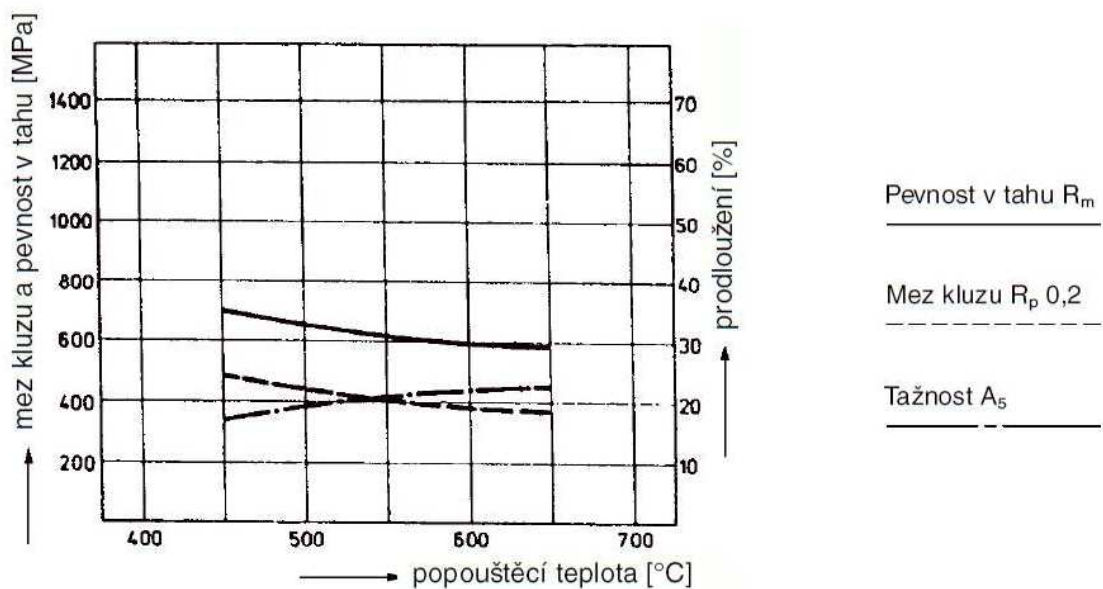
Příloha 4 (4/4)

Vlastnosti oceli 12 040 (C35E, 1.1181) [19]

OCEL 12 040

ČSN 41 2040

Popouštěcí diagram



Pás prokalitelnosti

